

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**DESARROLLO DE UN PROCESO DE MANUFACTURA RÁPIDA DE
PIEZAS QUIRÚRGICAS**

POR
JOSÉ ANTONIO OLIVARES TREVIÑO

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

ENERO 2014

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

**DESARROLLO DE UN PROCESO DE MANUFACTURA RÁPIDA DE
PIEZAS QUIRÚRGICAS**

**POR
JOSÉ ANTONIO OLIVARES TREVIÑO**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN,

ENERO, 2014

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros de comité de la tesis "Desarrollo de un proceso de manufactura rápida de piezas quirúrgicas" realizada por el Ing. José Antonio Olivares Treviño sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Dr. Marco A. Hernández Rodríguez
Asesor

Dr. Arturo Juárez Hernández

Dr. Melvyn Álvarez Vera

VoBo.
Dr. Moisés Hinojosa Rivera

San Nicolás de los Garza, N.L. a Septiembre de 2013

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, a mi esposa, a mis asesores y a mis amigos que siempre me apoyaron.

ÍNDICE

RESUMEN.....	7
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	8
Hipótesis	9
Objetivo General	10
Objetivos Específicos.....	10
CAPITULO 2 ANTECEDENTES	11
2.1 Investment casting.....	11
2.1.1 Pasos del proceso de Investment Casting	11
1) Fabricación del molde	12
2) Inyección de Cera	12
3) Ensamblaje	14
3) Construcción del revestimiento cerámico.....	15
4) Extracción de cera	17
5) Vaciado.....	18
6) Remoción del molde cerámico.....	19
7) Retiro de la pieza	20
8) Acabado y Operaciones Secundarias.....	21
2.2 Prototipado Rápido.....	23
2.2.1 Métodos de prototipos rápidos.....	25
Estereolitografía.....	25
Fabricación de objetos laminados.....	27
Modelado por deposición de fundido	28
Sinterización Selectiva por Láser	29

Impresión Tridimensional.....	31
CAPÍTULO 3 EXPERIMENTACIÓN.....	34
3.1 Introducción	34
3.2 Procedimiento Experimental	34
3.2.1 Diseño de Pieza en software	35
3.2.2 Vaciado de Pieza en software.....	36
3.2.3 Reforzado de Pieza en software	38
3.2.4 Aumento de dimensión de la pieza en software	39
3.2.5 Reparto de la pieza en varias ensamblables.....	40
3.2.6 Impresión de la pieza en máquina de prototipado rápido.....	41
3.2.7 Revestimiento cerámico	42
3.2.8 Proceso de dilución de ABS	43
3.2.9 Sinterizado del Cerámico.....	44
3.2.10 Vaciado del Metal.....	44
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.X Diseño en CAD de Prótesis de Cadera	45
4.X Acondicionamiento de modelo en CAD.....	46
4.X Impresión de Prótesis de Cadera en Máquina de Prototipado por deposición de ABS fundido	46
4.X Limpieza del modelo.....	¡Error! Marcador no definido.
4.X Proceso de Investment Casting	48
4.X Acabado de la Pieza	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52

RESUMEN

Actualmente, la mayor parte el equipo quirúrgico en México es importado por empresas privadas que están enfocadas más al comercio que a la fabricación de las mismas, esto provoca que su costo aumente para los consumidores finales. Éste método de importación y venta, hace que el catálogo de productos disponibles sea centrado a la demanda de la mayoría de los consumidores, provocando una problemática que es principalmente de disponibilidad, a las que se enfrentan tanto los hospitales como los pacientes, haciendo que el sistema sea inflexible a cambios y peculiaridades que en caso de atenderse serían altamente costosas.

La motivación de este trabajo se centra en el hecho de producir instrumental quirúrgico en nuestro país, cumpliendo con los estándares de calidad requeridos para este tipo de productos, logrando disminuir los precios a los consumidores finales, generando fuentes de empleo y brindando servicios de salud más económicos en tiempos más cortos.

Éste trabajo trata del desarrollo de un proceso de manufactura rápida para la producción de material quirúrgico de alta calidad, mediante una variante en el método de *“Investment Casting”* (cera perdida). Para esto se realizó una investigación sobre el método de impresión de Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), sus ventajas y procesos necesarios para integrarlo al método de cera perdida.

Para lograrlo se desarrolló y se modificó el proceso de *“Investment Casting”*, usando una máquina de prototipos rápidos de (ABS), con el cual se imprimió un modelo de un implante quirúrgico de cadera, se diseñó el árbol de colada y se analizaron los posibles defectos de fundición. Con este proceso se logró dar flexibilidad al proceso de manufactura, reduciendo el costo y tiempo de manufactura.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El proceso de manufactura de componentes quirúrgicos es un área poco desarrollada en nuestro país. Las empresas en México se dedican a la importación de éste tipo de productos, en su mayoría desde países como Estados Unidos, Brasil, Francia, Alemania, China y Pakistán.

Actualmente existen dos métodos de manufactura de componentes quirúrgicos: el forjado y la fundición, siendo el forjado el más común y costoso.

Un método del proceso de fundición es el “*investment casting*” (también llamado proceso de cera perdida) que es visto como un tipo de fundición de precisión para la fabricación de piezas de metal de casi cualquier aleación y utilizado para la producción de componentes complejos de una forma económica, cualidades que lo hacen el proceso idóneo para la manufactura de componentes quirúrgicos.

El proceso de cera perdida sigue una serie de pasos que se realizan en cadena para llegar a una pieza final fundida. Los principales problemas de este proceso son las siguientes:

- Se debe de asegurar una consistencia homogénea en la cera a inyectar.
- Se debe de fabricar un molde metálico para la pieza de interés y del árbol de fundición, el cual resulta costoso.
- En cada modificación al diseño ya sea del árbol o de la pieza se tienen que hacer nuevos moldes o retrabajarlos.
- Al diseñar los moldes en aluminio, existen limitaciones geométricas debido a los ángulos de ataque de herramienta y ángulos de salida.
- El armado de los árboles de colada requiere de tiempo y habilidad del personal.

Debido a estos problemas es importante buscar una variante en el método de armado de árboles que lo haga más eficiente.

El proceso de prototipado rápido permite obtener una pieza sólida de geometría compleja. Ésta pieza puede ser fabricada por medio de polvos aglutinados o inyección de algún polímero.

De éste proceso se obtienen piezas que son diseñadas directamente por computadora, permitiendo ser rediseñadas o modificadas de acuerdo a requerimientos de calidad. Ésta es una de las ventajas más importantes en cualquier proceso de manufactura por disminuir los costos y acelerar el tiempo de respuesta.

El ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$) es un plástico utilizado de forma amplia en las máquinas de prototipado rápido, por su resistencia y su bajo costo.

Por lo tanto, con este proyecto se pretende demostrar que mediante la tecnología de prototipado rápido combinada con el proceso de cera perdida se puede llegar a un método de manufactura de precisión de piezas quirúrgicas más flexible, confiable y económico.

HIPÓTESIS

Integrando las nuevas tecnologías de prototipado rápido por deposición de (ABS), se pueden fabricar piezas quirúrgicas más complejas, con una mayor flexibilidad y en un menor tiempo, que por el método de cera perdida convencional.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar la integración de los métodos de “*investment casting*” con el de prototipado rápido por deposición de (ABS) como proceso de manufactura para piezas quirúrgicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Análisis del proceso de cera perdida.
- Diseño de piezas quirúrgicas en CAD de 3 dimensiones.
- Estudio del proceso de impresión de prototipos rápidos en (ABS).
- En base al estudio anterior, incorporar la impresión en (ABS) al proceso de cera perdida.
- Generación del modelo en impresión (ABS) con la estructura interna hueca.
- Fabricación del revestimiento cerámico.
- Disolución del (ABS) dentro del revestimiento.
- Sinterización de los árboles de colada.
- Vaciado de las piezas de fundición.

METODOLOGÍA

1. Elaboración de la pieza en 3D en un software de diseño.
2. Aplicación de ajustes de diseño en la pieza para favorecer el proceso de manufactura.
3. Manufactura de la pieza en máquina de prototipado rápido por deposición de (ABS) fundido.
4. Fabricación de la concha cerámica sobre el modelo de (ABS).
5. Disolución del modelo de (ABS) usando acetona.
6. Sinterizado del molde cerámico.
7. Vaciado de piezas de fundición.

CAPITULO II. ANTECEDENTES

2.1 Investment casting

El proceso de “*investment casting*”, también llamado proceso de cera perdida, es visto como un proceso de fundición de precisión para la fabricación de piezas de metal de casi cualquier aleación y se utiliza generalmente para la producción de componentes complejos (1). Utilizado por civilizaciones antiguas para usos artesanales, en la construcción de ídolos y joyería.

El uso de éste método se explotó en la década de 1940 como resultado de exigencias militares en la industria de herramental (2). El “*investment casting*” demostró ser eficiente, confiable y rentable para la realización de piezas con formas precisas en aplicaciones militares y de aleaciones especializadas que no se podrían formar por métodos tradicionales.

Con este proceso no sólo produce formas complejas, sino también puede proporcionar una excelente exactitud dimensional (0.005” para la primera pulgada y 0.002” para cada pulgada adicional) produciendo piezas visualmente atractivas en cuanto a tolerancias y que requerirán mínimo maquinado posterior.

2.1.1 Pasos del proceso de investment casting

A continuación se enlistan los pasos a seguir para la manufactura usando el proceso de “*investment casting*”.

1) Fabricación del molde

El proceso comienza con la fabricación de un molde (generalmente de aluminio o acero) en el que se producirán los patrones de cera con la geometría exacta que tendrá la pieza final, como el que se puede observar en la **Figura 2.1**. Sin embargo, estos patrones se hacen ligeramente más grandes para compensar la contracción volumétrica durante la solidificación del metal en el revestimiento cerámico (3).

Las ceras utilizadas en el proceso son creadas a partir de productos de la industria del petróleo con la propiedad de tener un bajo punto de fusión y solidificación rápida haciéndolas ideales para el uso en producción en serie.

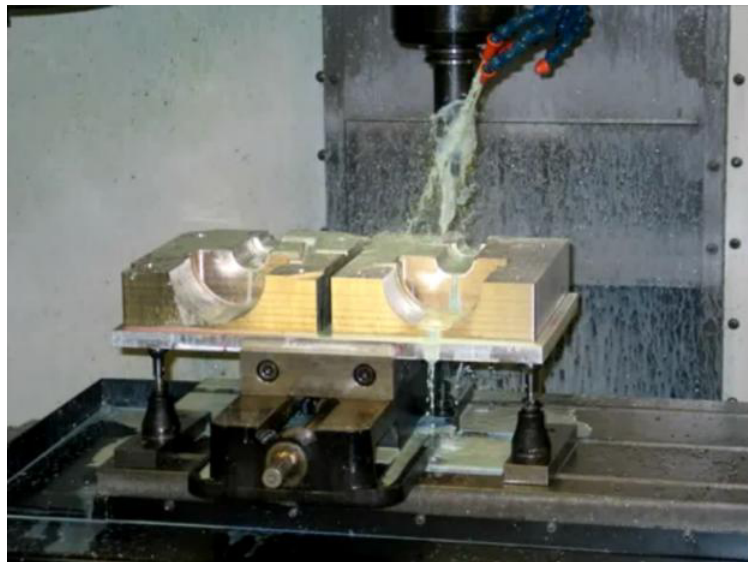


Figura 2.1 Fabricación de los moldes para la inyección de cera, mediante el uso de una fresadora de control numérico.

2) Inyección de Cera

Una vez maquinado el molde, se inyecta la cera haciendo uso de una máquina inyectora de cera, la cual es un dispositivo que calienta la cera para fundirla a aproximadamente 70 °C y mediante presión, la inyecta en el molde a través de las cavidades de alimentación previamente maquinadas. Una vez inyectada la cera se deja enfriar el molde de forma pasiva o activa

(mediante circulación de agua) para que la cera solidifique y haciendo posible extraer el patrón. (**Ver Figura 2.2**).



Figura 2.2 Dispositivo de inyección de cera del molde bipartido.

Una vez extraído el patrón, se verifica que no tenga defectos corrigiéndolos de ser necesario haciendo uso de herramientas metálicas y calor (**Figura 2.3**). También se corta la cavidad de alimentación por donde se inyecta la cera, aunque en ciertos casos se diseña intencionalmente para utilizarse en el siguiente paso. Éste proceso de inyección puede repetirse varias veces para producir más patrones y usarlos en una sola operación de fundición (**Figura 2.4**).

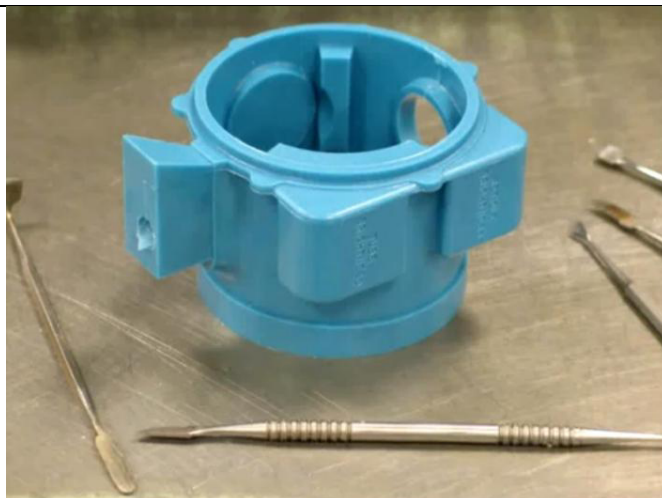


Figura 2.3 Patrón en cera extraído del molde.



Figura 2.4 Proceso de fabricación de patrones para árboles de fundición.

3) Ensamblaje

Con los patrones de cera, se procede al ensamblaje del árbol de colada, que consiste en montar cada patrón de cera sobre un eje central que actuará como alimentador (**Figura 2.5**), el patrón de cera es unido al eje central mediante pequeños ataques y en ocasiones venteos los cuales varían en número, tamaño y geometría dependiendo de la configuración deseada del árbol y el tipo de aleación (4).

Un ataque es el conducto por el cual el metal entra al molde, mientras un venteo es un orificio que permite que el aire o gases puedan escapar cuando el metal es vertido dentro del molde.

El extremo superior del árbol de colada tiene una forma de V, al cual se le llama copa de llenado o mazarota y sirve como guía del metal durante la operación de vaciado y aporta material durante el proceso de contracción por solidificación. Esta copa generalmente es formada con cera o simplemente se le da la forma con el mismo investimento cerámico con el cual es fabricado el molde.

Los patrones se unen al árbol de colada usando calor además de herramientas metálicas, lo cual funde la cera uniéndola en la posición de vaciado, éste proceso es muy laborioso y es realizado a mano.



Figura 2.5 Armado del árbol de fundición.

4) Construcción del revestimiento cerámico

El ensamble completo de cera es lavado, secado y sumergido en una mezcla de material cerámico (lodo cerámico), drenándolo y cubriéndolo con arena cerámica fina (**Figura 2.6**), posteriormente se deja secar (5). Esta primera capa es la más importante ya que está en contacto directo con el molde, reproduciendo los más finos detalles y asegurando un buen acabado superficial.

Este proceso se repite varias veces (**Figura 2.7**), usando grados progresivamente más gruesos de material cerámico hasta que se haya formado una cáscara de suficiente espesor (6-8 mm) para los procesos siguientes. El revestimiento cerámico debe soportar altas temperaturas y ser lo suficientemente fuerte para resistir el vaciado del metal líquido.



a)



b)

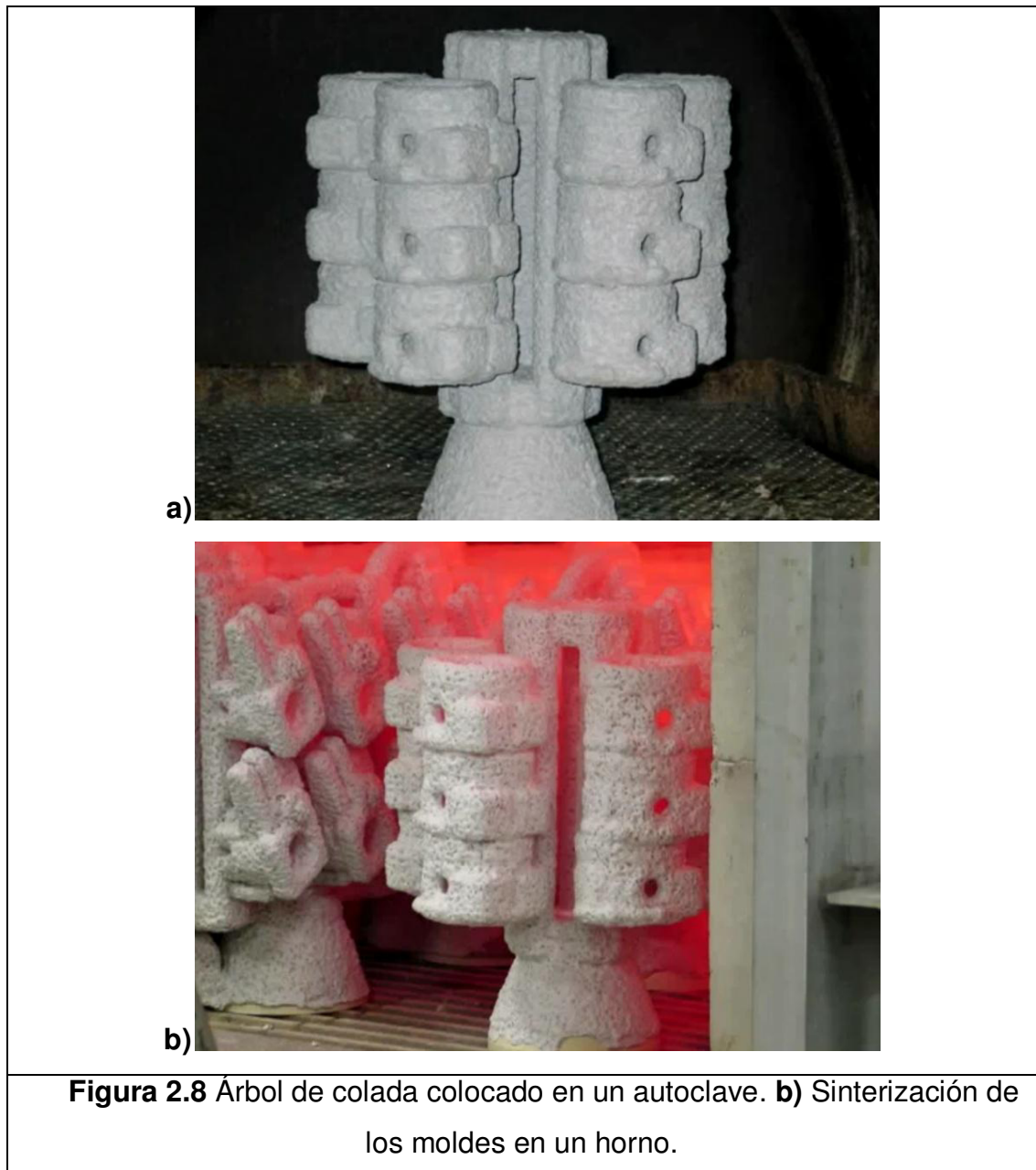
Figura 2.6 a) El árbol de fundición se sumerge en una mezcla de material cerámico (lodo cerámico) y b) recubrimiento de arena cerámica fina.



Figura 2.7 Repetir el proceso de revestimiento con arenas cada vez más gruesas la capa cerámica se vuelve más gruesa y resistente.

5) Extracción de cera

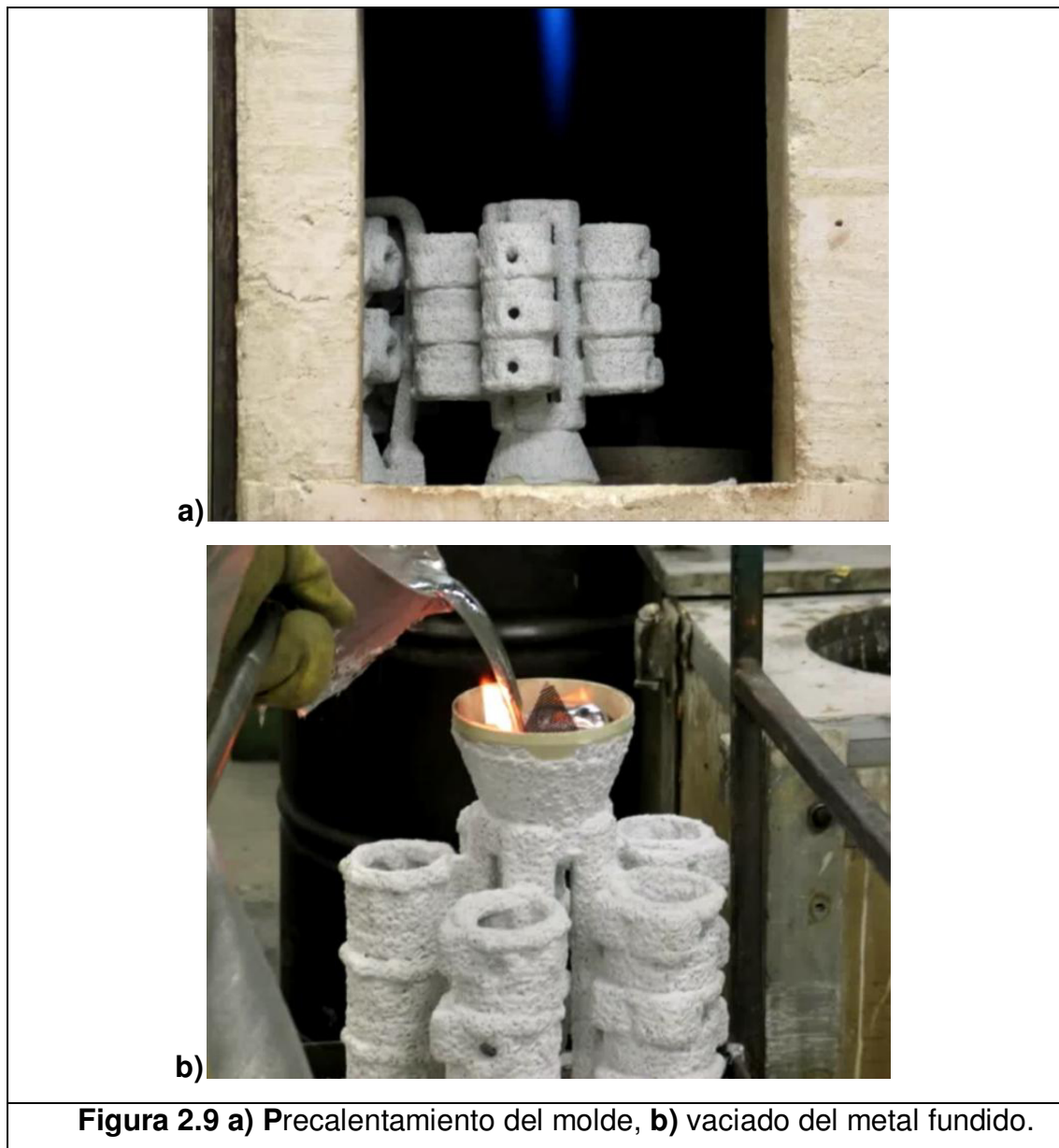
El árbol de colada se coloca en una autoclave de vapor para quitar la mayor parte de cera (**Figura 2.8a**) y la cantidad restante es quemada en un horno a alta temperatura (800 °C o más) en donde, además, se favorece el endurecimiento del molde y se hace un más poroso contribuyendo a la liberación de gases atrapados (**Figura 2.8b**). De esta manera se deja una cáscara de material cerámico que contiene las cavidades deseadas para obtener la pieza final.



6) Vaciado

En este paso se retiró todo el material que pudiera bloquear el paso del metal conservando solo el molde de cerámico. Después, se precalienta a una temperatura específica (870 °C - 1100 °C) y se llena del metal fundido (**Figura 2.9**). Los moldes se pueden vaciar con el metal fundido con la ayuda de la gravedad, del vacío, de la presión o de la fuerza centrífuga. Esto permite la reproducción de los detalles más finos y complejos del patrón original al liberarse los gases a través de los venteos y poros del molde (6).

Típicamente, se utiliza la fusión por inducción porque es rápida, eficiente y flexible en el cambio de aleaciones (15).



7) Remoción del molde cerámico

Una vez que el metal ha solidificado y el revestimiento cerámico se ha enfriado, se retira la concha por golpeo, vibración mecánica, limpieza química, u otros métodos (7). (**Figura 2.10**)

a)



b)



Figura 2.10 a) Se retira la concha cerámica, **b)** árbol después varios procesos de limpieza.

8) Retiro de la pieza

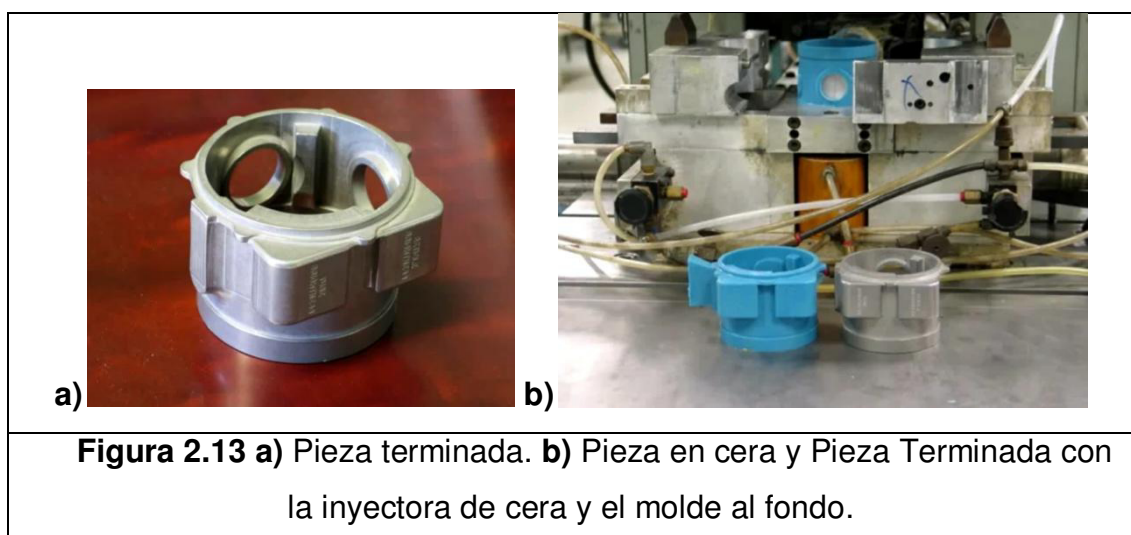
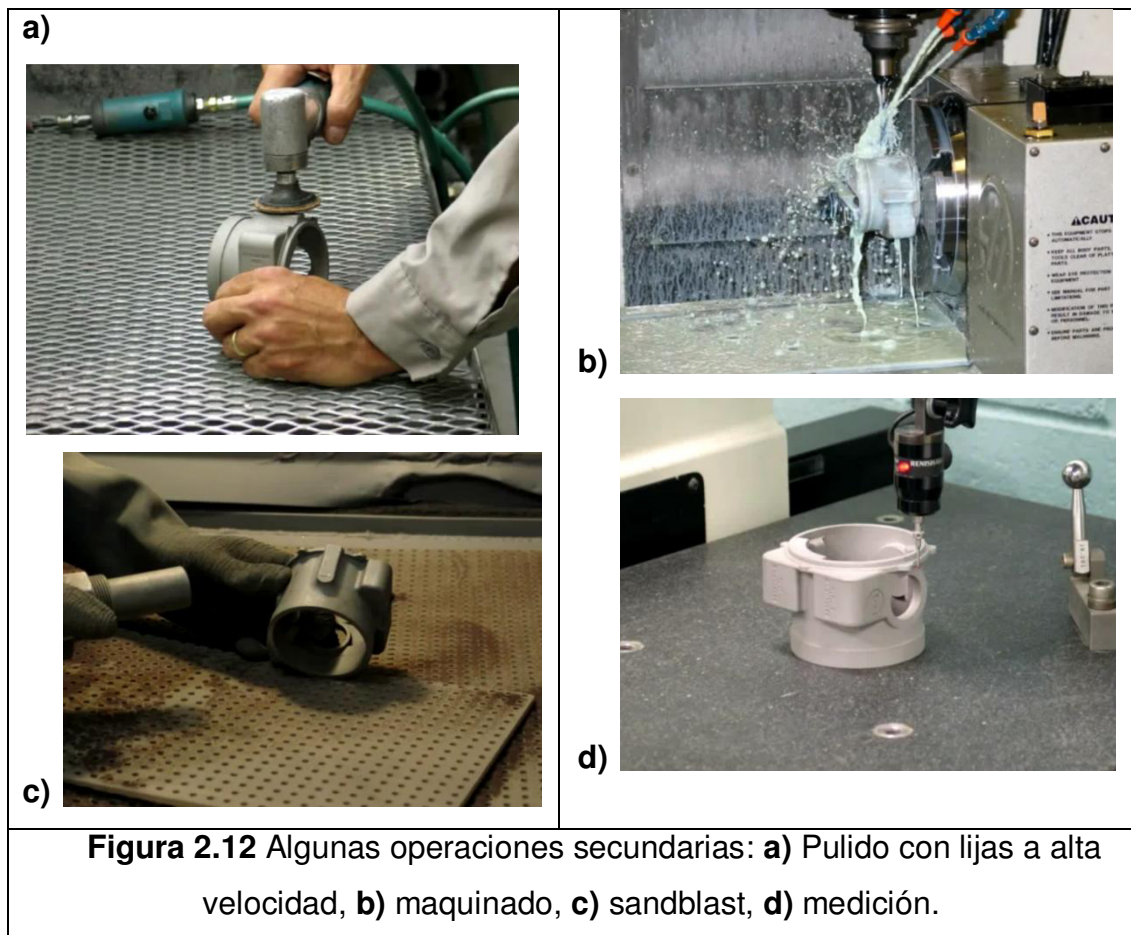
Las piezas individuales son quitadas del árbol mediante cortes precisos en los ataques utilizando cortes mediante máquinas herramienta como sierra cintas y también se lijan los bordes ásperos dejados por el corte (**Figura 2.11**).



9) Acabado y Operaciones Secundarias

Las piezas vaciadas están listas para las operaciones secundarias por ejemplo: tratamientos térmicos, deformado, maquinado, acabado final, inspección, pruebas no destructivas, etc. (**Figura 2.12**).

Mediante inspección y medición de la pieza final se puede modificar o mejorar el molde para que otorgue a la pieza mejor acabado y tolerancias geométricas, lo cual lo hace un proceso que puede mejorarse continuamente (**Figura 2.13**).



2.2 Prototipado Rápido

El prototipado rápido es un proceso utilizado para fabricar artículos de plástico, metal o cerámica, es también conocida como *"Additive Technology"* ya que su proceso de fabricación es ir añadiendo material capa a capa. En algunos casos con propiedades físicas similares a las que se producirían por métodos convencionales, como moldeo por inyección y extrusión, o moldeo por soplado, de ésta manera se evita el fabricar los costosos moldes para realizar un prototipo que podría cambiar su forma.

Inicialmente el prototipado rápido sólo se usaba para la fabricación de piezas no funcionales, pero hoy en día se utiliza como un proceso de fabricación más. Un ejemplo se encuentra en el sector dental; en el cual se utiliza para fabricar las estructuras metálicas que luego irán recubiertas de cerámica creando coronas y puentes dentales (8).

Hay varios tipos de prototipos:

- **Prototipos de diseño:** sirven para evaluar aspectos estéticos y ergonómicos.
- **Prototipos geométricos:** se usan para probar concordancia geométrica, la forma y los ensambles.
- **Prototipos funcionales:** prueban y muestran las características del producto final.
- **Prototipos técnicos:** se usan para evaluar todas las funciones de la pieza final.

En el diseño de una nueva pieza se tienen que tomar en cuenta diversos aspectos como la factibilidad de producción, la estética, la ergonomía, la funcionalidad, la capacidad de ensamblado, entre otros. En el cual el diseño a profundidad de la pieza es una parte fundamental de todo el proceso. De esto depende el éxito o fracaso de la manufactura, ya que un error puede acarrear innumerables problemas en la producción.

Durante muchos años los prototipos han sido esenciales en el diseño de nuevas piezas, los cuales han evolucionado en procesos como el tallado, vaciado, moldeado, entre otros, y en los materiales utilizados como madera, arcilla, yeso, etc. Siempre buscando realizar la evaluación física de un producto antes de adquirir, fabricar o iniciar un proceso productivo.

Debido a la atmósfera actual de producción de nuevos productos a un ritmo constante, la fabricación de prototipos es una necesidad, en la que el reto ha sido siempre la reducción de tiempo y esfuerzo requerido para su fabricación.

Bajo estas circunstancias han surgido nuevas tecnologías que permiten la elaboración de prototipos rápidos, los cuales se definen como la conversión de un modelo diseñado en computadora, con datos CAD (Computer Aided Design – Diseño Asistido por Computadora), a uno sólido.

Existen dos grandes grupos de prototipos:

- **Método sustractivo**

Consisten en moldear un bloque de material a través de técnicas como mecanizado, fresado, torneado o taladrado. Las ventajas son el acabado, la producción en masa, la composición del material, el tamaño y la exactitud de la pieza. Sin embargo, no se pueden utilizar para producir partes con geometría muy complicada.

- **Método aditivo**

Consisten en moldear una pieza añadiendo material, ya sea en capas o gotas, entre ellas se encuentran principalmente la estereolitografía, la fabricación de objetos laminados y la sinterización selectiva por láser o por deposición de gotas. En general, estos métodos utilizan diversos tipos de material, desde fotopolímeros, como acrilatos o epóxicos, a polímeros como el ABS y el poliacrilato, también pudiendo ser otros compuestos, como cera,

metales, cerámicas, arena o, incluso, papel. Éstas se han posicionado como las más rápidas, de allí su nombre de prototipos rápidos.

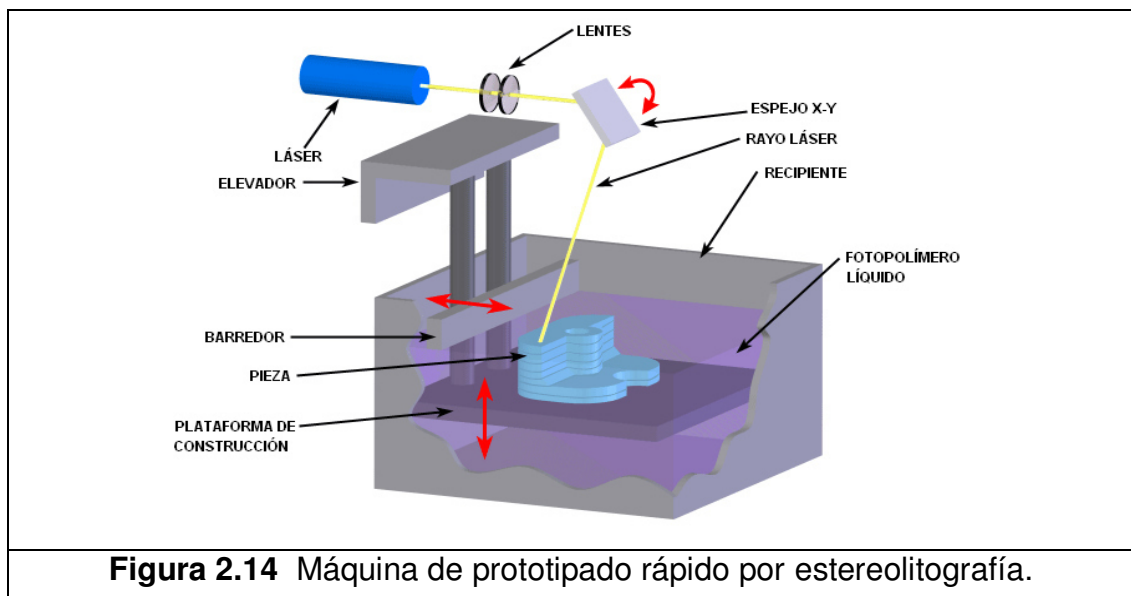
2.2.1 Métodos de prototipos rápidos

Existen muchas formas de elaborar prototipos rápidos. Sin embargo el principio de todos los métodos es el mismo; construir el modelo a través de varias capas o por depósito o fusión de gotas o partículas. En la actualidad, los procesos más comunes son:

Estereolitografía

La estereolitografía es la tecnología de prototipado rápido más ampliamente usada. Ésta puede producir piezas poliméricas a detalle y altamente precisas.

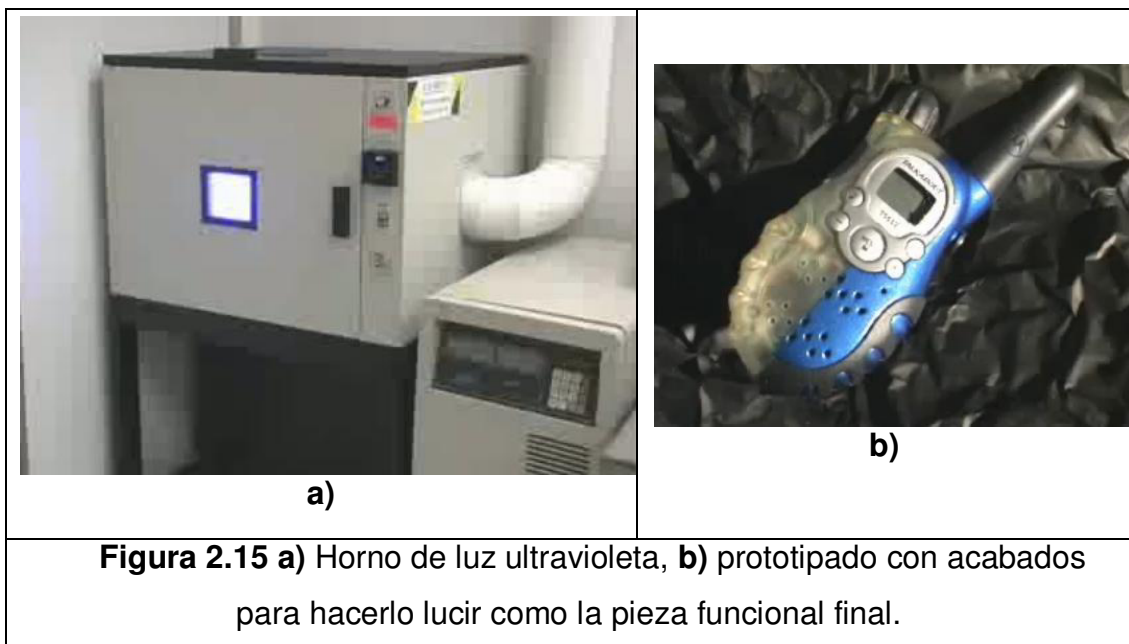
Fue el primer proceso de prototipado rápido, introducido en 1988 por 3D Systems, Inc., basado en trabajos del inventor Charles Hul (9). El método usa un láser ultravioleta (UV) de baja potencia altamente enfocado para trazar secciones de un objeto tridimensional sobre un recipiente lleno de un polímero fotosensible. En la **Figura 2.14**, se enlistan sus partes y funcionamiento.



Conforme el láser barre la sección del sólido a formar, el polímero se solidifica y las áreas no tocadas por el láser se mantienen líquidas. Cuando una sección es completada una cuchilla de nivelación es movida a través de la superficie para alisarla antes de depositar la siguiente capa.

La plataforma es descendida una distancia igual al espesor de la capa (típicamente 0.003 – 0.002 pulgadas), y una capa subsecuente es formada sobre las capas anteriores. Éste proceso de barrer con el láser y físicamente alisar la superficie es repetido hasta que la construcción de la pieza es completada. Una vez terminada la pieza, se eleva sobre del recipiente en donde se encuentra el polímero líquido y gracias a pequeñas perforaciones sobre la base del elevador, la pieza es drenada del exceso de material no solidificado.

En la mayoría de los casos, un proceso de curado final es aplicado al introducir la pieza en un horno de luz UV, como el mostrado en la **Figura 2.15 a)**. Después de éste curado se cortan los soportes si se utilizaron, además de que ya el material puede pulirse, lijarse o aplicársele pinturas o acabados como se puede observar en la **Figura 2.15 b)**.



La exactitud del proceso ha mejorado conforme se ha desarrollado un mayor número de resinas. Hace dos décadas la máxima resolución era de 400 micras, llegando ahora hasta las 100 micras, lo que permite que estos

prototipos puedan utilizarse en aplicaciones muy pequeñas o con un grado de acabado muy fino. Sus aplicaciones principales son las de verificación de forma y ajuste dimensional, pruebas funcionales, ajustes de cierre, piezas altamente detalladas, modelos de presentación de nuevos productos, entre otras.

Fabricación de objetos laminados

El primer sistema de manufactura de objetos laminados fue usado en 1991. Desarrollado por Helisys of Torrance, CA (10). Los componentes principales del sistema son un mecanismo que hace avanzar una hoja de material sobre una plataforma de construcción, un rodillo caliente que aplica presión para adherir la capa de material a la capa anterior y un láser que corta la silueta de la sección activa de la pieza a construir. En la **Figura 2.16**, se muestran las partes y el principio del método.

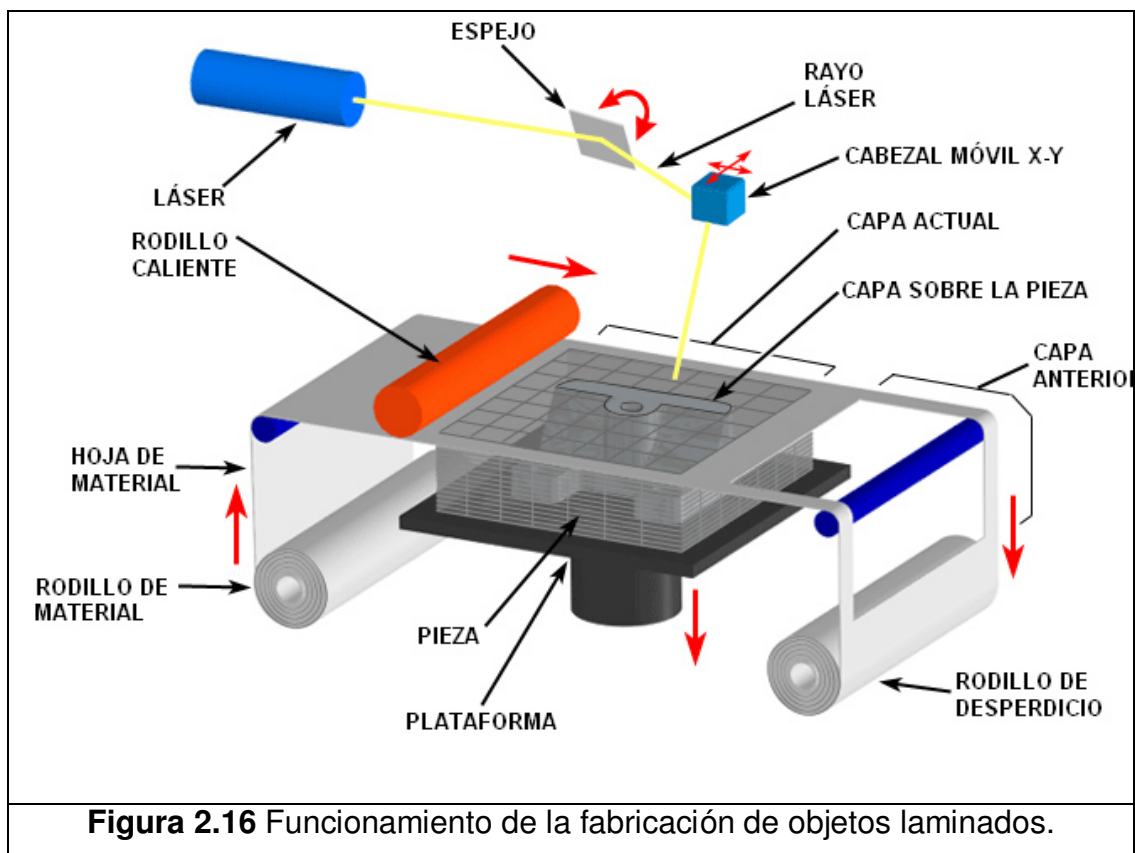


Figura 2.16 Funcionamiento de la fabricación de objetos laminados.

Las piezas son construidas por apilamiento, adhesión y corte de capas de hojas de material con una superficie adhesiva, una tras otra. Un láser

corta la orilla de la sección activa y una vez terminada esa sección la plataforma baja un espesor igual al grosor de la hoja de material (típicamente 0.002 – 0.020 pulgadas) y otra hoja es colocada encima de las hojas previamente depositadas. Una vez depositada la capa, la plataforma sube un poco y el rodillo caliente aplica presión para unirla con la anterior. Una vez cortado, el material extra permanece para darle soporte a la pieza durante la construcción.

Sus aplicaciones principales son las de prueba de ajuste, generación de piezas sin necesidad de detalle y patrones de herramientas rápidos. Por otro lado, puede considerarse un proceso sustractivo ya que se recorta la lámina de acuerdo a la figura de la capa. El tiempo de construcción varía dependiendo de la geometría y complejidad, con tolerancias de $\pm 0.13\text{mm}$.

Modelado por deposición de fundido

El modelado por deposición de fundido fue desarrollado por Stratasys en Eden Prairie, Minnesota (11). En éste proceso un material plástico o cera es extruido a través de una boquilla que recorre la geometría de sección de la pieza capa por capa. En la **Figura 2.17**, se muestran las partes principales de éste tipo de modelado.

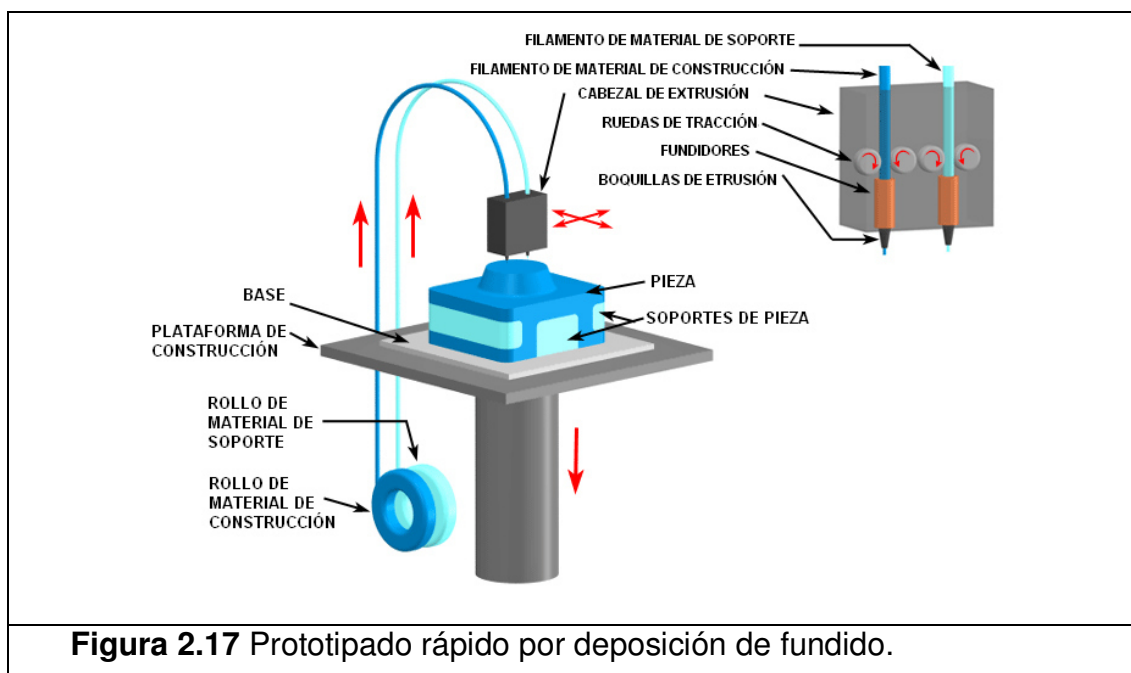


Figura 2.17 Prototipado rápido por deposición de fundido.

El material de construcción es usualmente obtenido en forma de filamento, pero algunos tipos de máquinas utilizan pellets desde una tolva. Las boquillas contienen termo resistencias que mantienen el plástico a una temperatura justo por encima de su punto de reblandecimiento para que pueda fluir fácilmente a través de ellas formando la capa.

El plástico se endurece inmediatamente después de fluir por la boquilla y se adhiere a la capa anterior. Una vez la capa está terminada, la plataforma desciende y la boquilla de extrusión deposita otra capa. El espesor de la capa y la precisión dimensional vertical es determinada por el diámetro del extrusor que va desde 0.013 a 0.005 pulgadas. En el plano X-Y se puede obtener una resolución de 0.001 pulgadas.

Una amplia gama de materiales pueden ser utilizados, incluyendo (ABS), poliamida, policarbonato, polietileno, polipropileno y cera para fundición por “*investment casting*”.

Sus aplicaciones son desde pruebas de forma y ensamble, así como funcionales, piezas pequeñas a detalle, modelos de presentación, entre otros.

Sinterización Selectiva por Láser

La sinterización selectiva por láser fue desarrollada en la Universidad de Texas en Austin, por Carl Deckard y colegas. La tecnología fue patentada en 1989 y fue originalmente vendida por DTM Corporation. DTM fue adquirida por 3D Systems en 2001 (12). El concepto básico del proceso es similar a la estereolitografía. Utiliza un rayo láser móvil para trazar y selectivamente sinterizar un material compuesto polímero en polvo y/o metal en sucesivas secciones transversales de la pieza tridimensional. En la **Figura 2.18** se muestran las partes y la operación de la sinterización selectiva por láser.

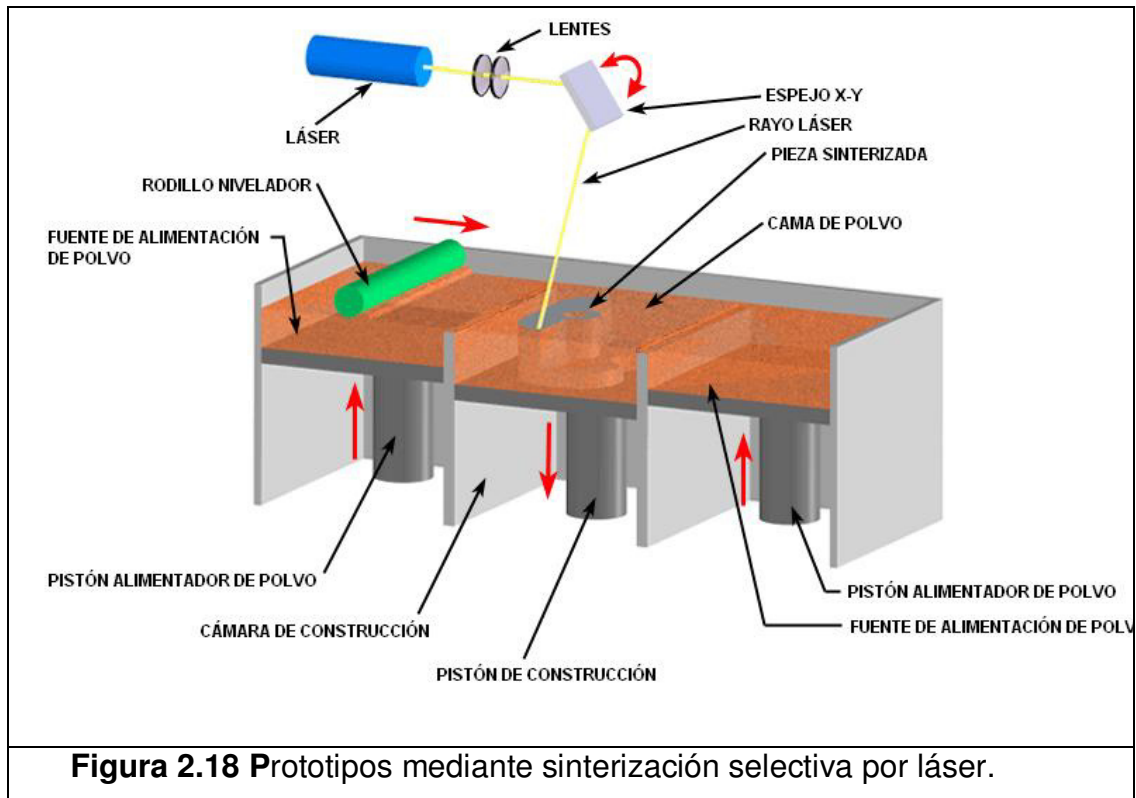


Figura 2.18 Prototipos mediante sinterización selectiva por láser.

Como en todos los procesos de prototipado rápido, las partes son construidas sobre una plataforma que ajusta la altura para que sea igual al espesor de una capa construida. Polvo adicional es depositado sobre cada capa solidificada y sinterizada. Este polvo es transportado por el rodillo nivelador desde la fuente antes de construir una capa nueva. El polvo es mantenido a una alta temperatura para que se funda fácilmente al exponerse al láser.

A diferencia de la estereolitografía las estructuras de soporte no se requieren, ya que el exceso de polvo en cada capa actúa como soporte para la pieza que está siendo construida.

Con el material de compuesto metálico, el proceso solidifica el polímero de base alrededor del polvo de metal (generalmente de 100 micras de diámetro), una capa a la vez, formando la pieza. Una vez terminada la pieza es colocada en un horno a temperaturas que exceden los 900 °C, en donde el polímero usado para la unión es quemado y la pieza se le agrega bronce para mejorar su densidad. El proceso de quemado y agregado generalmente

requiere un día, después del cual se le puede maquinar y trabajar en el acabado. Recientes mejoras en la precisión y resolución, han reducido la necesidad de un maquinado secundario y trabajos de acabado.

Este proceso permite usar una amplia gama de materiales, incluyendo nylon, SOMOS (tipo plástico), Truform (investment casting) y el compuesto metálico que se describió anteriormente.

Entre las aplicaciones que tiene éste método de prototipado están las pruebas de forma y ensamble, pruebas funcionales, piezas con poco detalle, piezas con ensambles de enganche o bisagras, entre otros.

Impresión Tridimensional

La tecnología de impresión tridimensional fue desarrollada en el Massachusetts Institute of Technology y se vendió el desarrollo a varias compañías (13). El proceso es similar a la Sinterización selectiva láser, pero en lugar de usar un láser para sinterizar el material, se utiliza un cabezal inyector que deposita adhesivo líquido que une el material. En la **Figura 2.19**, se muestran las partes principales de una máquina de impresión tridimensional.

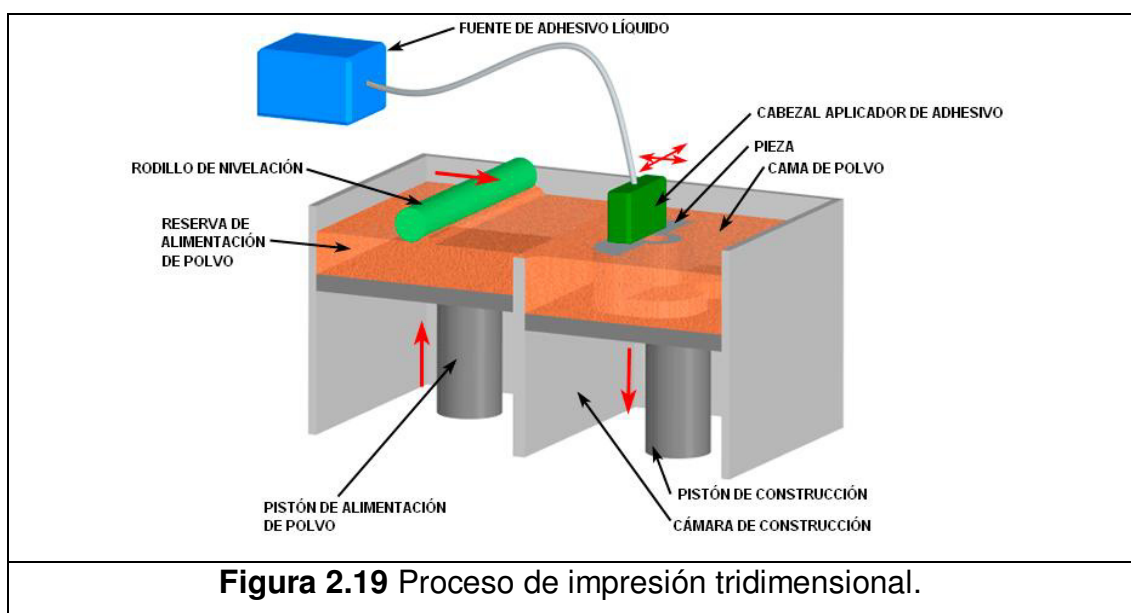


Figura 2.19 Proceso de impresión tridimensional.

Las opciones del material pueden ser polvos metálicos o cerámicos, los cuales son poco costosos comparándolos con otros procesos aditivos. Éste proceso ofrece la ventaja de una rápida construcción, de 2 a 4 capas por minuto, sin embargo, la precisión, el acabado superficial y la resistencia de la pieza no son tan buenas como las piezas obtenidas por otros procesos aditivos.

Éste proceso es usualmente utilizado para la construcción de modelos conceptuales, aunque pruebas funcionales pueden realizarse pero sin llevar al extremo la resistencia física de la pieza.

La impresión tridimensional empieza con la fuente de polvo siendo levantada por un pistón y un rodillo de nivelación distribuye una capa muy delgada de polvo sobre la superficie de la cámara de construcción. Una cabeza impresora multicanal deposita un líquido adhesivo a regiones específicas de la superficie de polvo. Estas regiones de polvo se unen por el adhesivo y forman una capa de la pieza. El polvo que no recibe adhesivo sirve de soporte de la pieza durante la construcción.

Después de que una capa es construida, la plataforma de construcción es descendida y una nueva capa de polvo se añade, se nivela y la impresión, añadiendo adhesivo, de una nueva sección se repite.

Una vez que la pieza está completa, el polvo que se encuentra suelto puede ser removido y se retira la pieza. Casi siempre las partes hechas con éste método son sumergidas en algún tipo de sellador para aumentar su resistencia y mejorar su apariencia superficial.

Entre las aplicaciones se encuentran los modelos conceptuales, pruebas funcionales (limitadas), modelos para ser pintados o evaluar su apariencia, entre otros.

En la actualidad es más común ver el desarrollo e integración de los prototipos rápidos en aplicaciones cada vez más extraordinarias, donde ya

no se limitan a ser muestras físicas, sino que se han convertido en una importante arma para aplicaciones médicas, refacciones de emergencia, vaciado de moldes y demás usos donde un buen desempeño físico es indispensable.

Si bien hasta ahora existe una interesante variedad de métodos para la fabricación de prototipos rápidos, el desarrollo a partir de ahora estará dado por nuevas generaciones de materiales para su manufactura donde un rango de mayor resistencia o texturas llevará a estos productos a nuevas áreas.

Actualmente los sistemas de producción de prototipos rápidos ya están siendo utilizados como medios de manufactura rápida, para productos cada vez más exigentes.

CAPÍTULO 3

EXPERIMENTACIÓN

3.1 Introducción

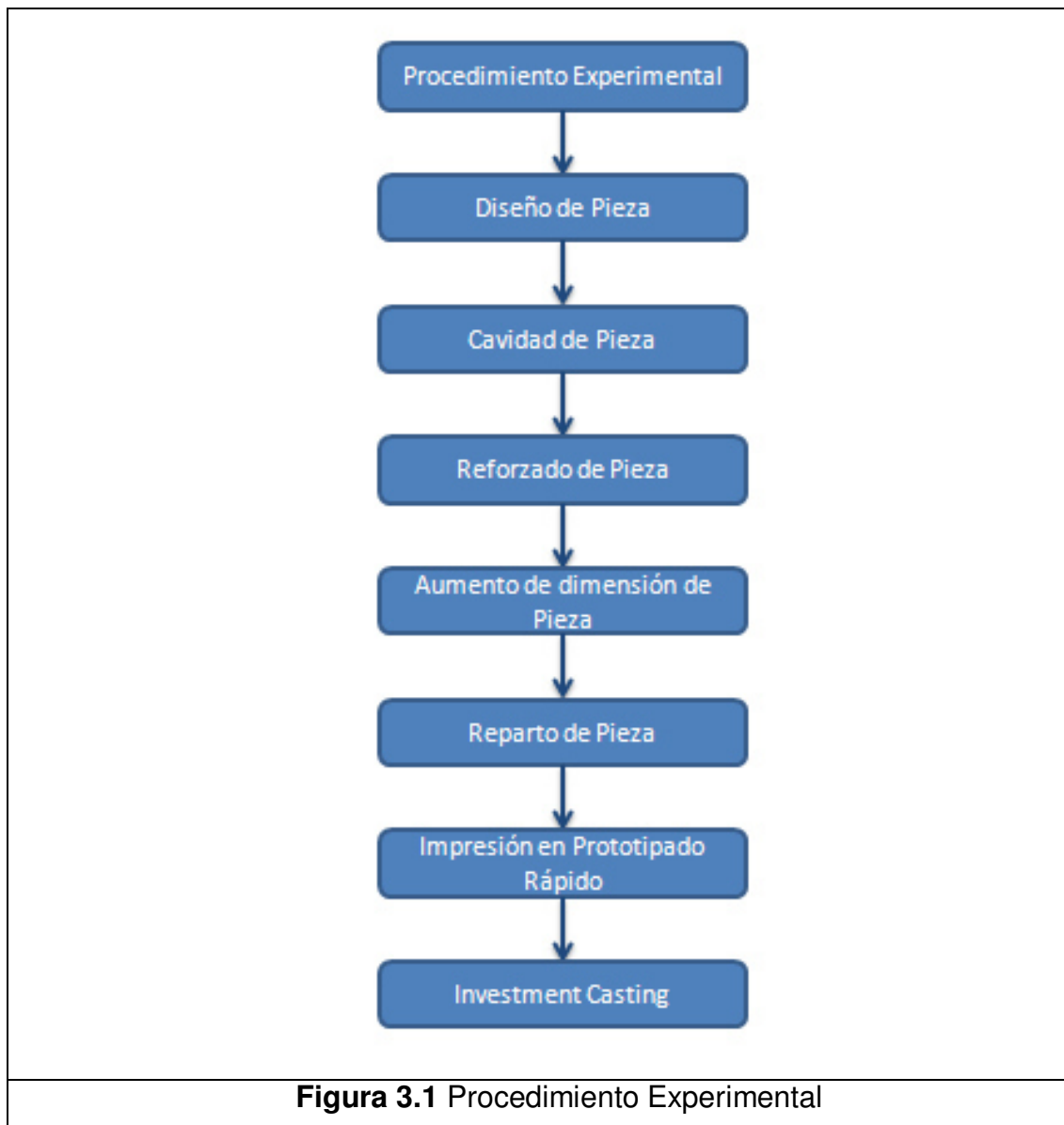
En el presente capítulo se describen los pasos para la manufactura de piezas quirúrgicas mediante el uso de prototipado rápido e “*investment casting*” y se analiza el mejor método de prototipado rápido a usar para llegar a una pieza funcional.

3.2 Procedimiento Experimental

En la **Figura 3.1** se presenta un diagrama esquemático en donde se enlistan los pasos durante el proceso de experimentación.

El proceso se refiere al proceso para la fabricación de patrones huecos de materiales poliméricos producidos mediante tecnologías de prototipado rápido, para su uso en la elaboración de moldes cerámicos en el proceso de fundición de precisión.

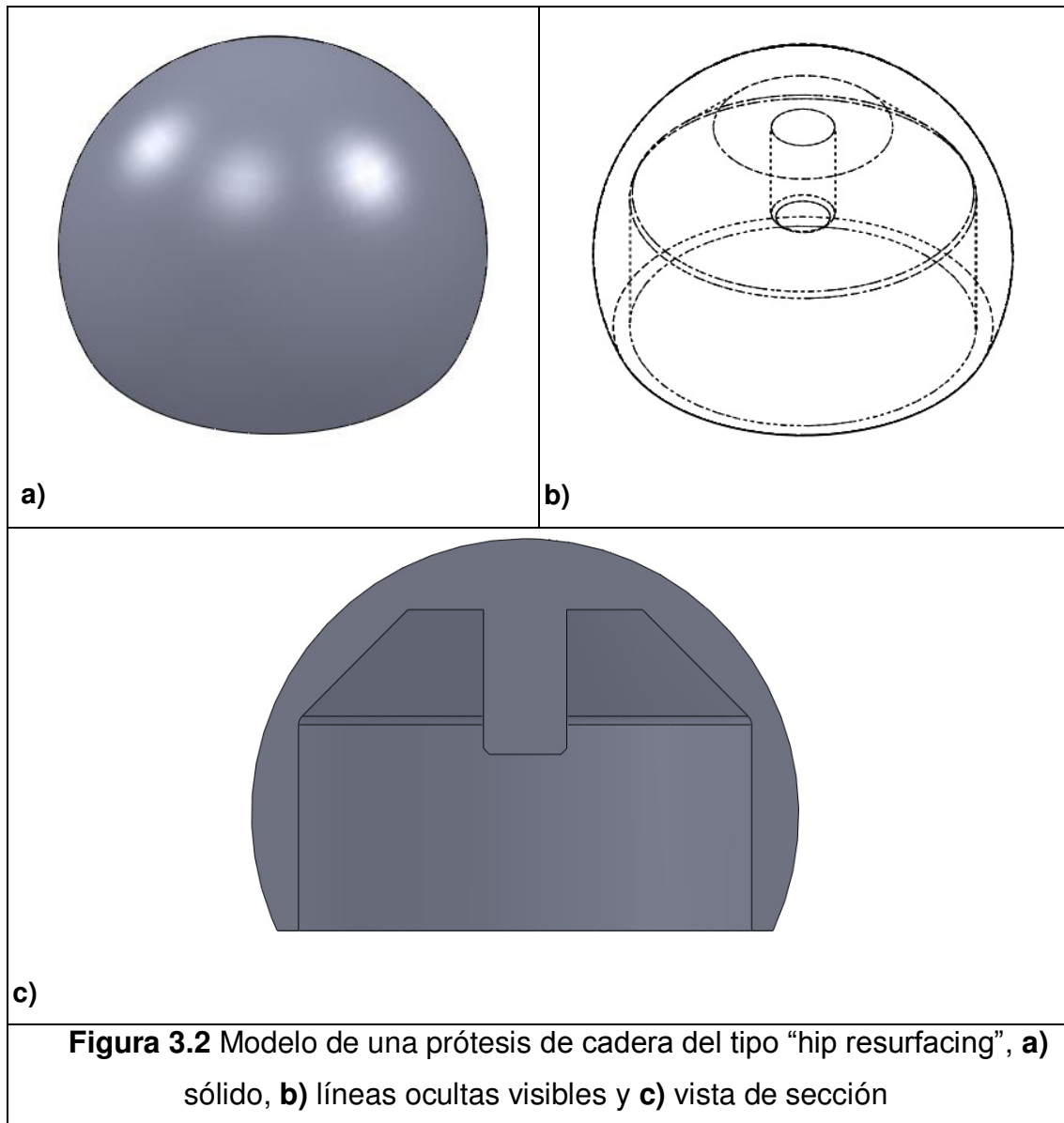
El objeto de esta invención es el proceso para la fundición de precisión que nos permita la manufactura de patrones totalmente diferentes a los que actualmente existen gracias a su diseño interior hueco, permitiendo ser utilizados directamente en la fabricación de moldes cerámicos y con las ventajas de evitar agrietamiento y fractura en los mismos, además de ahorro en tiempo durante el proceso.



3.2.1 Diseño de Pieza en software

Para empezar con la fabricación, se realiza un modelo en algún software de diseño 3D en el cual se elabora la geometría del material quirúrgico a fabricar. El nivel de complejidad del mismo sólo se puede ver limitado por el proceso de prototipado rápido, ya que la naturaleza de éste afectará en el proceso de manufactura (14).

En la **Figura 3.2**, se muestra el modelo de una prótesis de cadera del tipo “*hip resurfacing*” o prótesis de superficie, la cual presenta dificultad de fabricación por métodos convencionales.



Una gran ventaja de este método es que se puede dar al modelo una geometría correcta para el paciente, así evitando colisiones o molestias en la implantación del mismo, se podría decir que se puede “personalizar” la manufactura del material quirúrgico, en éste caso, la prótesis de cadera.

Los siguientes pasos son utilizados para adecuar el modelo para el proceso de prototipado rápido.

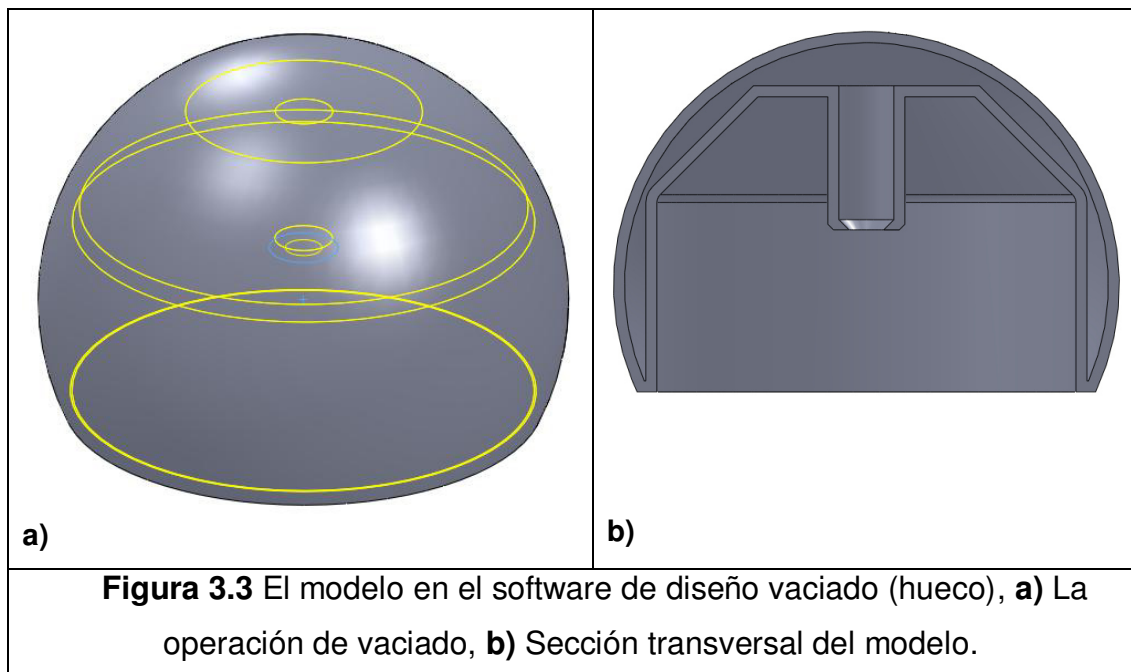
3.2.2 Vaciado de pieza en software

Se debe vaciar la pieza en el software de diseño. En éste paso se requiere que la pieza esté hueca por varias razones:

- Ahorro de material: para el prototipado aumenta la rentabilidad de la pieza y genera en menos tiempo la generación del modelo
- Fácil disolución: también el hecho de que sea hueco hace más fácil la dilución del mismo con acetona, ya que contiene menos material, lo cual se verá a detalle más adelante.
- Evitar fracturar el molde: evita la expansión del material durante un paso posterior de calentamiento en un dado caso.

Una vez vaciado el modelo utilizando el software se genera una superficie con un cierto espesor, el cual tiene que ser revisado, ya que de éste depende la integridad del modelo físicamente. También debe de revisarse la resolución con la que puede trabajar la máquina de prototipado, para que se pueda realizar.

En la **Figura 3.3** se presenta el modelo ya vaciado con la opción de la asignación de espesor.



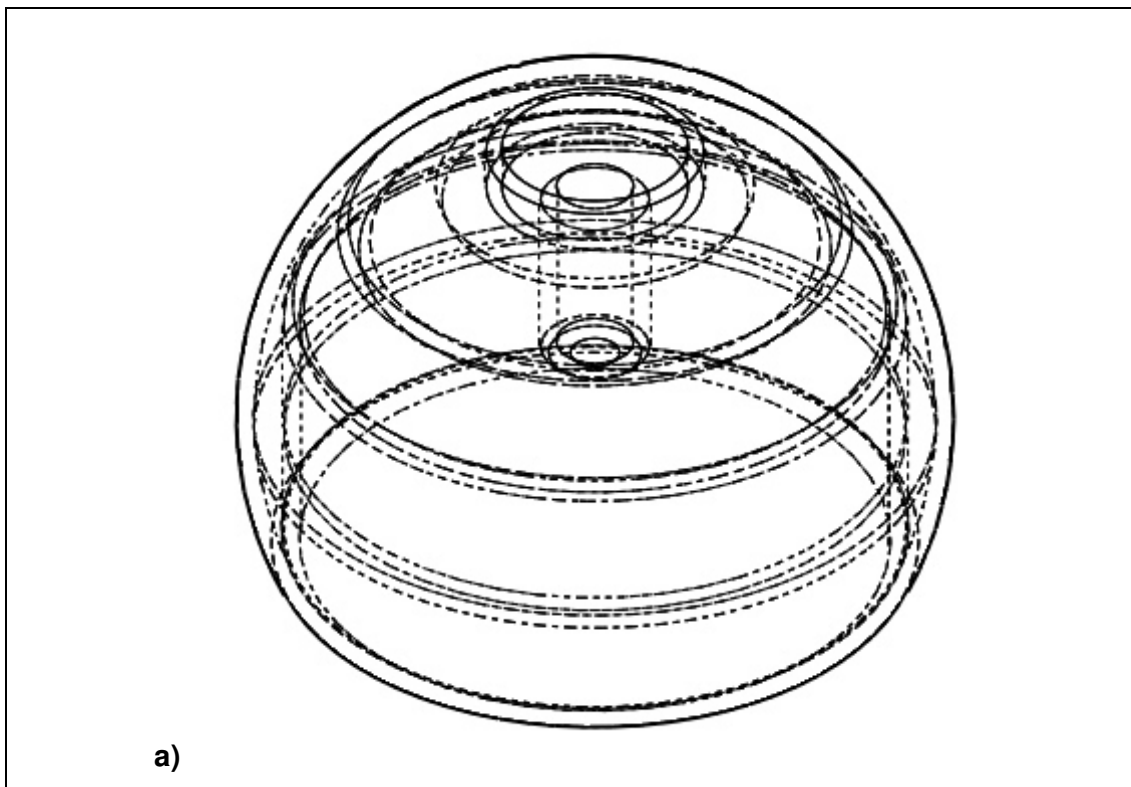
La mayoría de las veces el modelo a producir es fácil de vaciar, pero esto dependerá de su geometría, entre más complicada ésta sea, requiere que el espesor de la pared sea más delgada, resultando en que físicamente las capas del material al imprimirse, por su bajo diámetro, no se adhieren y el

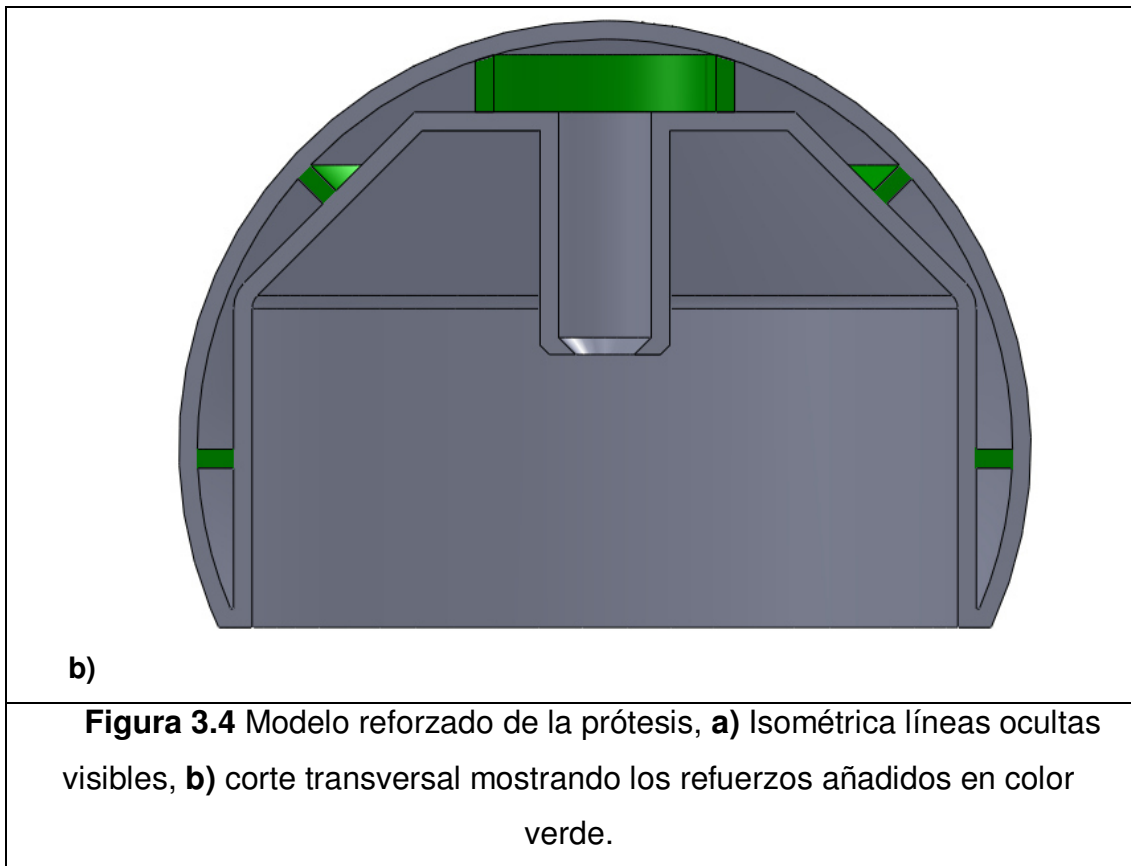
modelo no se produce de forma correcta, para solucionar éste problema se debe de generar una superficie con un espesor mayor que de mejores resultados.

3.2.3 Reforzado de Pieza en software

Debido al ahorro de material al hacerlo hueco y trabajar con el espesor mínimo, el modelo puede ser frágil. Éste problema se incrementa cuando en el modelo se presentan caras paralelas grandes, o con espacio relativamente grande entre sí sin caras transversales o ángulos de unión que les otorguen refuerzo.

Para resolver este problema, se pueden añadir paredes o “costillas” internas, las cuales se generan en el modelo mediante el software, poniendo especial atención en las zonas más críticas, las formas de estos refuerzos pueden ser cilindros huecos o costillas, o combinaciones de ambos, con espesores iguales los de la superficie del modelo para evitar añadir más material del necesario.





En la **Figura 3.4**, se observan refuerzos añadidos al modelo para evitar su fragilidad al momento de generarlo en forma física, debido a su cavidad interna.

Generando éstas estructuras de refuerzo se asegura que no sufra ningún daño o deformación durante los procesos siguientes.

3.2.4 Aumento de dimensión de la pieza en software

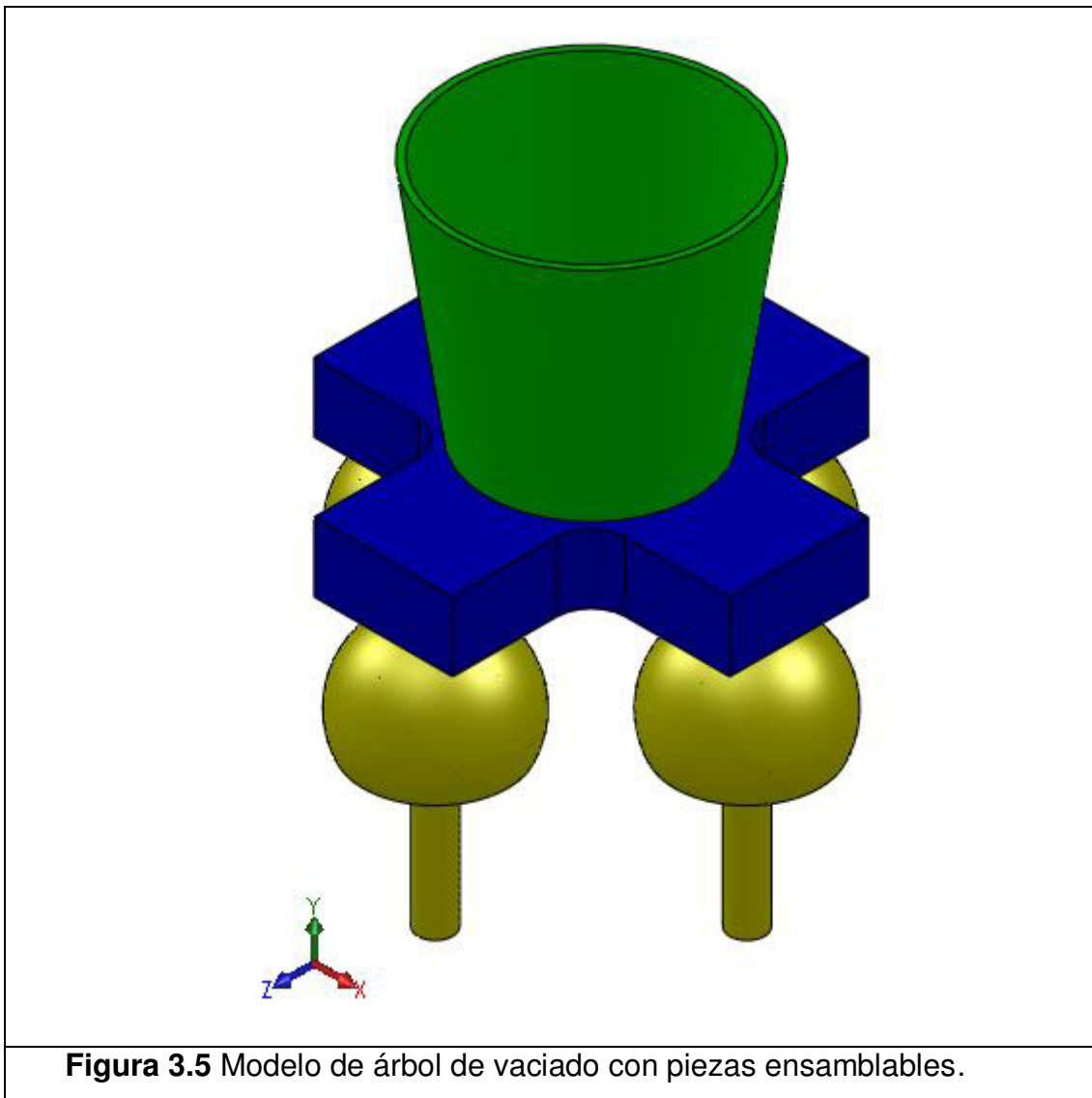
El aumento de dimensiones del modelo para generar un molde, es una práctica utilizada por el método de fundición, ya que el material metálico después de vaciarlo, al enfriarse, se contrae y cambia su geometría (15). Es por eso que al modelo una vez terminado hasta éste punto se le debe de agregar un factor de escala el cual depende del material a fundir (16).

Éste proceso se hace de forma automática en el software de diseño, sólo insertando el parámetro de escalamiento y seleccionando el modelo.

3.2.5 Reparto de la pieza en varios ensamblables

En caso que la pieza sea muy grande para las dimensiones de la máquina de prototipos rápidos, se puede segmentar en una serie de piezas que pueden ensamblarse después de forma sencilla.

Para esto se usan cortes con geometrías ensamblables, con segmentos de superficie en posiciones de geometrías planas, generalmente en venteos, alimentadores o algún sobre material que no afecte el acabado de la pieza. Esto se puede apreciar en la **Figura 3.5**. En el árbol de fundición, el alimentador en verde, el árbol en azul y las piezas en color amarillo.

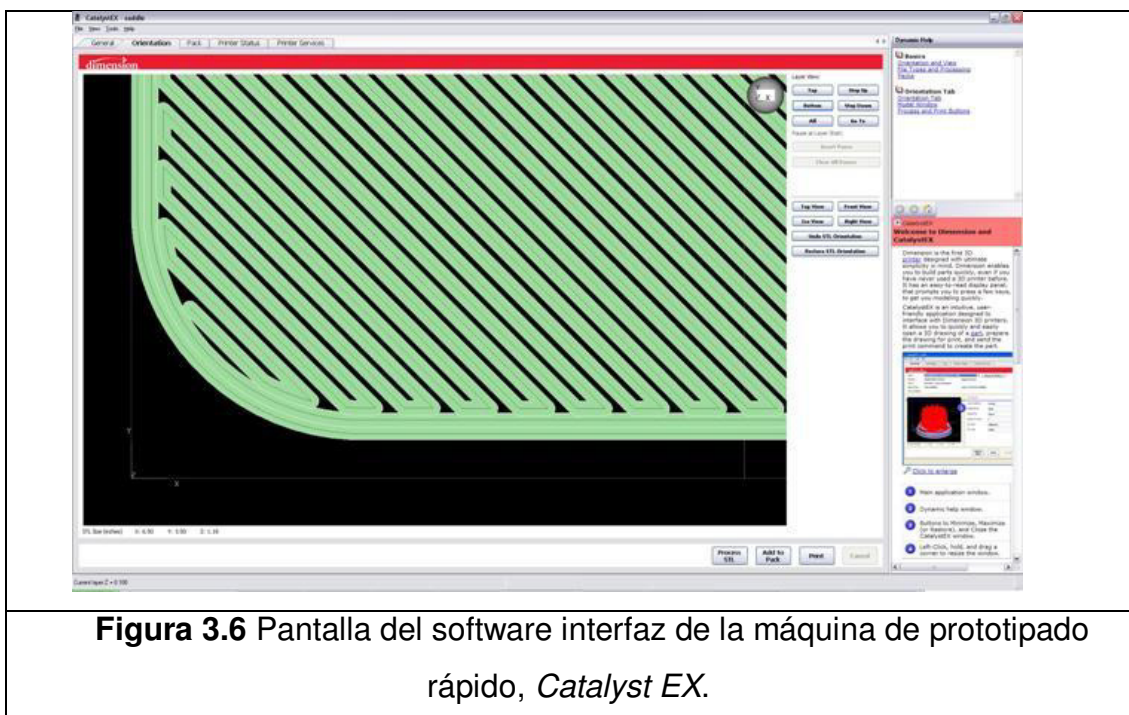


Una vez que está impreso el modelo, al ser ensamblado se puede unir mejor las piezas añadiendo acetona o algún pegamento de contacto, para mejorar la unión de las piezas y no afectar la integridad física del mismo.

3.2.6 Impresión de la pieza en máquina de prototipado rápido

Con el modelo preparado para la impresión, se exporta la pieza o piezas al software de interfaz de la máquina de prototipado, en donde se coloca sobre el área de impresión y se obtienen otros valores, como el gasto de material, el tiempo de impresión, entre otros.

Se eligió el método de prototipado rápido por deposición de fundido de (ABS) debido a que es uno de los métodos más ecoómicos y precisos de los antes mencionados, además que el (ABS) favorece la remoción del modelo en los futuros pasos. En la **Figura 3.6**, se observa el modelo importado al software *Catalyst EX*, de la máquina *Stratasys Uprint by Dimension*, en la cual se va a imprimir el modelo.



3.2.7 Revestimiento cerámico

Una vez terminado el proceso de impresión del modelo en la máquina de prototipado rápido se procede a un lavado del patrón de interior hueco de polímero con acetona, utilizando un paño suave impregnado con éste líquido, esto se hace para eliminar impurezas, residuos o materia orgánica y de esta manera favorecer la futura adhesión del recubrimiento cerámico. Este proceso también suaviza un poco las irregularidades de la superficie del modelo, mejorando el acabado de la pieza final, ya que disuelve la capa externa del material.

El revestimiento cerámico se fabrica con diversos materiales cerámicos. El proceso consiste en la preparación preferentemente de 6 a 15 capas de recubrimiento, lo que equivale a un espesor aproximado de al menos 3 a 6 mm.

La primera capa corresponde a la inmersión del patrón de polímero hueco en el lodo cerámico y es la más importante debido a que se encuentra directamente en contacto con el modelo dando una reproducción casi en su totalidad de la superficie del mismo. La pieza se puede dejar secar entre un rango de 30 minutos a 24 horas entre capa y capa dependiendo de las condiciones de humedad del ambiente. En la **Figura 3.7**, se observa el proceso de la fabricación del revestimiento cerámico sobre modelos de cera, el proceso es el mismo para modelos de ABS.





Figura 3.7 Proceso de fabricación del revestimiento cerámico, **a)** inmersión en lodo cerámico, **b)** Aplicación de la arena sílica.

El lodo cerámico es fabricado preferentemente con aglutinante de sílice coloidal o cualquier cerámico en estado coloidal al cuál se le añade arena sílica de malla preferentemente de # 100 a # 350. La mezcla se deja en agitación antes de su uso.

Cada capa se forma en dos pasos: el primero es la inmersión del patrón en el lodo cerámico que actuará como aglutinante, promoviendo la adhesión de la arena sílica que se aplica en el segundo paso.

Finalizada la fabricación de una gruesa capa del revestimiento cerámico, la pieza se deja secar para proceder con la extracción del polímero.

3.2.8 Proceso de dilución de ABS

Ya seco el revestimiento cerámico se procede a retirar el material de ABS del mismo, para hacer esto simplemente se vierte acetona en cantidades generosas sobre el molde, dejando que éste diluya el modelo impreso, para luego enjuagarlo y retirar el líquido.

Para asegurarse que el modelo se retira por completo el molde debe de ser agitado un poco e inclinado hacia las zonas con ángulos negativos. Éste proceso solo dura algunos minutos y no es necesario retirarlo completamente, ya que en el proceso siguiente se encarga de cualquier residuo restante.

3.2.9 Sinterizado del Cerámico

Una vez extraído el polímero, el molde cerámico deberá soportar la presión metalostática al momento del vaciado, por lo que se debe realizar un sinterizado que consiste en incrementar la temperatura del molde favoreciendo el endurecimiento y fortalecimiento del mismo haciéndolo más poroso, además de eliminar el polímero residual en caso de haberlo.

El molde cerámico se mantiene a una temperatura de entre 400 °C y 900 °C para lograr el quemado del polímero y después se eleva hasta alcanzar un rango de 900 °C – 1300 °C con el fin de extraer el polímero evaporándolo y dejar la cavidad totalmente libre para la entrada del metal. Hay que recordar que debido a que la pieza de material polimérico es hueca y se atacó previamente con la acetona, se evita el común agrietamiento del molde causado por la expansión de la cera que se utiliza en el método de fundición de precisión convencional.

3.2.10 Vaciado del Metal

Una vez sinterizado el cerámico, se procede a precalentarlo, para vaciarle el metal del cual se fabricará el material quirúrgico. Luego se procede a quebrar el recubrimiento cerámico por cualquier método antes mencionado, se retiran las piezas de interés y se procede a darles un acabado o re trabajo.

CAPÍTULO 4

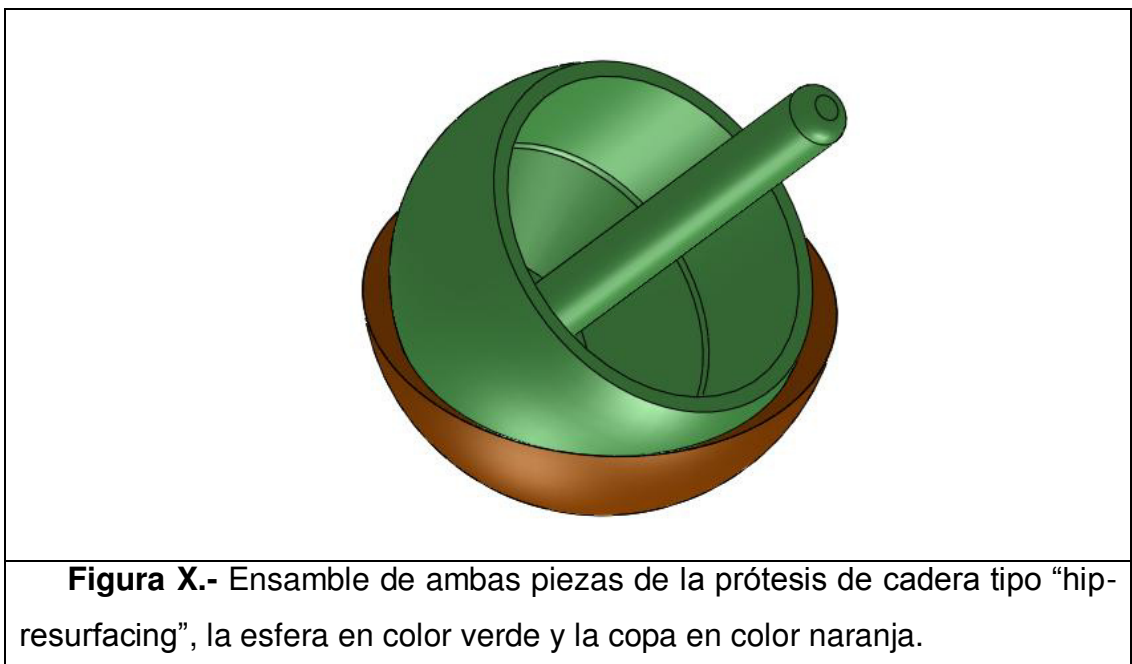
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Diseño en CAD de Prótesis de Cadera

Como ya se revisó anteriormente, el proceso empieza con el diseño tridimensional de la pieza quirúrgica, el cual puede ser probado mediante otros software de cad para estimar su vida útil o analizar su resistencia mecánica, mediante métodos de elementos finitos.

Una gran ventaja de éste método, es que la prótesis puede ser altamente personalizable, es decir, que pueden tomarse radiografías o hacerle estudios al paciente y adecuar la prótesis dimensionalmente a sus necesidades físicas con gran exactitud.

También pueden realizarse análisis de colisión, como por ejemplo en el diseño de la prótesis mostrada en la **Figura X**, en donde se realizó una simulación en un ensamble con su contraparte, enfocado en el movimiento, al cual estaría sometida la prótesis, y analizar futuras posibles colisiones al estar implantado en el paciente.



4.X Acondicionamiento de modelo en CAD

Una vez hecho estudios de la prótesis así como adecuar y validar su diseño, se procedió a acondicionar la prótesis a fundirse según los pasos anteriormente mencionados, ya adecuados a la aleación **ASTM-F 75-07**, a fundirse la prótesis.

Primeramente se ajustó dimensionalmente la prótesis para contrarrestar la contracción del material al enfriarse, el dato se encuentra en la **Tabla X**, esto se realiza en el software de diseño.

Después de esto, se procede a generar la cavidad en el modelo de la prótesis, usando las operaciones embebidas del software de diseño, solo que al realizar ésta operación se borra una de las caras del modelo.

Al realizar ésta operación hay que tener cuidado de no generar una pared muy delgada que haga que el modelo se vuelva frágil o que afecte la adhesión de las capas del polímero.

4.X Impresión de Prótesis de Cadera en Máquina de Prototipado por deposición de ABS fundido

Se escogió la *Stratasys Uprint By Dimension*, por estar disponible en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, además de que es una de las mejores máquinas de prototipado rápido en el mercado y el material es ampliamente comercializado además de barato. En la **Figura X** se muestra una fotografía de la máquina.



Figura X.- Fotografía de la máquina de prototipado rápido por deposición de ABS fundido, *Stratasy's Uprint*.

Ya teniendo el modelo listo, se inserta el modelo en la interfaz para la máquina y en éste se prepara la posición correcta de la prótesis para que favorezca la impresión así como el acomodo del material de soporte.

Ya que se prepara la máquina para la generación del prototipo, solo es cuestión de ejecutar el comando para imprimir y esperar, en éste caso un tiempo de 30 minutos.

Después de impresa se procede al lavado, en donde se retire el material de soporte, además de limpiar la pieza con un poco de acetona para eliminar residuos.

En la **Figura X** se muestra un par de piezas de muestra de la prótesis ya impresa en la máquina por deposición de ABS fundido.



Figura X.- Prótesis impresa en la máquina de prototipado por ABS fundido.

4.X Proceso de Investment Casting

El proceso desde aquí se lleva a cabo de forma normal como si se tratara de un modelo de cera para fundición.

Las operaciones realizadas se enlistan a continuación:

- a) Impresión de las demás piezas para formar el árbol de fundición diseñado, tanto de los modelos de prótesis (**Figura X**) como de los elementos del árbol.



b) Preparación del lodo cerámico y aplicación de arenas, así como el proceso de vaciado agregando acetona.





b)

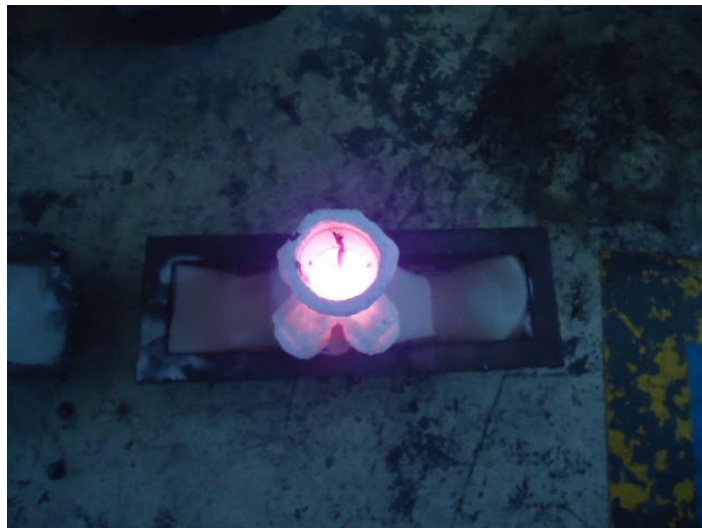
Figura X.- a) Preparación del lodo cerámico, **b)** Molde de cerámica ya seco y con el modelo de ABS ya diluido por la acetona.

c) Se sinterizaron los moldes cerámicos a 800 °C, eliminando también los residuos de ABS remanentes en el molde. Como se observa en la **Figura X.**



Figura X.- Moldes de cerámica sinterizados a 800°C.

d) Una vez sinterizado el molde, se precalienta como se observa en la **Figura X a)**, para después verter el material fundido de la aleación **ASTM-F 75-07**, **Figura X b)**.





CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De éste procedimiento experimental se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se logró generar un modelo digital tridimensional de una pieza quirúrgica que pudiera imprimirse por el método de prototipado rápido de ABS fundido.
- Se ahorró material de ABS al hacer el modelo hueco y dándole un espesor a la pared suficiente para que pudiera imprimirse y para que el prototipo fuera estable mecánicamente.
- El lodo cerámico se adhiere con éxito al ABS sin necesidad de añadir ningún otro medio.
- Se diluyó el ABS con acetona, eliminándolo del molde y dejando la concha cerámica en un negativo casi sin residuos.
- Las piezas fundidas resultantes fueron satisfactorias, tanto en medidas finales como en la ausencia de defectos de fundición.

- Éste proceso demostró que, al utilizarse reduce el tiempo de manufactura para piezas quirúrgicas.
- Permite al diseñador hacer cambios en su pieza añadiéndole o removiendo material según el caso, o modificar su tamaño simplemente al cambiar el factor de escalamiento.
- El maquinado es necesario para obtener el acabado superficial requerido para éste tipo de prótesis, por lo que debe llevarse a cabo para dar por terminada la pieza

En cuanto a futuros trabajos sobre el tema, se recomienda lo siguiente:

- Siempre que se use una prototipadora rápida por ABS fundido, tratar de usar lo menos posible de material y usarlo lo más fresco/nuevo posible, ya que la humedad ocasiona fallos en la deposición del polímero.
- El modelo al salir de la prototipadora posee una superficie “rugosa” que se puede eliminar con una lija fina para disminuir éstas marcas en el molde de fundición y por ende en la pieza final.
- Al diluir el ABS de la concha cerámica se recomienda verter y vaciar la acetona en periodos de 2 a 3 minutos agitando el molde de forma que se genere un vórtice dentro del mismo, esto para evitar la acumulación de residuos en el molde que puedan generar defectos.
- Si el material de ABS no se adhiere de forma correcta en el proceso de elaboración del prototipo por parte de la máquina, utilice un espesor de pared mayor para evitar éste defecto de fabricación.

REFERENCIAS

1. **Fred R. Sias, Jr., Ph.D.** *Lost-Wax Casting: Old, New, and Inexpensive Methods*. s.l. : Woodsmere Press, 2005.
2. **E., Sopcak J.** *Handbook of Lost Wax or Investment Casting*, p. 4. s.l. : Gem Guides Book Company, 1986.
3. **American Foundrymen's Society, Inc.** *Handbook on the Investment Casting Process*, p. 15-24. s.l. : Illinois, 1993.
4. **Borrajo J. M., Martínez R. A., Boeri R. E., Sikora J. A.** *Nuevos Procesos de Diseño y Fabricación de Piezas Coladas*, p. 30 -34. s.l. : Anales SAM, 1999.
5. **Castings, Kovatch.** <http://www.kovatchcastings.com/technicalinfo.htm>. Consultado el 13 de enero del 2010.
6. **al, Cramer S. et.** *Liquid Metal Model Experiments on Casting and Solidification Processes*, p. 7285-7294. s.l. : Journal of Materials Science, Vol. 39, 2004.
7. **al, Kohl R. et.** *Fundición a la Cera Perdida: Materiales para Modelos*, p.50-52. s.l. : CONAMET 02-05, 2003.
8. **Groover, Mikel P.** *Fundamentals of Modern Manufacturing; Materials, Processes, and Systems. Third Edition*. s.l. : John Wiley & Sons Inc, 2007.
9. **Cumin, J., Raos, P. and Grizelj, B.** *Rapid Prototyping - 3D*. s.l. : Manufacturing Engineering, 2008. ISSN 1335-7972.
10. **Gebhardt, A.** *Rapid Prototyping*. s.l. : Hanser Gardner, 2003. ISBN 978-1569902813.

11. **Chua, C. K., Leong, K. F. and Lim, C. S.** *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. Singapur : World Scientific Publishing, 2004. ISBN 981-238-120-1.

12. **Grimm, T.** *User's Guide to Rapid Prototyping*. s.l. : Society of Manufacturing Engineers, 2004. ISBN 978-0872636972.

13. **Kamrani, A. K. and Nasr, E. A.** *Rapid Prototyping: Theory and Practice*. s.l. : Springer, 2006. ISBN 978-0387232904.

14. **B., Ravi.** *Metal Casting: Computer-Aided Design and Analysis*, p. 55-81. s.l. : Prentice Hall of India, New Delhi, 2005.

15. **A., Sabau.** *Alloy Shrinkage Factors for the Investment Casting Process*, p. 131-140. s.l. : Metallurgical and Materials Transactiones B, Vol. 37, N° 1, 2006.

16. **Porter W., Sabau A.** *Alloy Shrinkage Factors for the Investment Casting of 17-4PH Stainless Steel Parts*, p. 317-330 . s.l. : Metallurgical and Materials Transactiones B, Vol. 39, N° 2 , 2008.

17. **Krunic, S., Perinic, M. and Maricic, S.** *Rapid Prototyping: Application*. s.l. : Engineering Review, 2010. ISSN 1330-9587.

Índice de Figuras

Figura 2.1	12
Fabricación de los moldes para la inyección de cera, mediante el uso de una fresadora de control numérico, generalmente el material utilizado es de aleaciones de aluminio o acero	
Figura 2.2	13
Dispositivo de inyección de cera, en donde se observa el molde bipartido con el patrón en cera ya solidificado (azul)	
Figura 2.3	13
Patrón en cera extraído del molde, se corta el canal de alimentación de cera y se eliminan defectos	
Figura 2.4	14
El proceso de inyección se repite para formar suficientes patrones para utilizarlos en una misma árbol de fundición	
Figura 2.5	15
El armado del árbol de fundición, en donde se montan los patrones en un arreglo en el cual pueden ser vaciados en una misma operación, en ésta foto se observa el árbol de colada en rojo y la copa de llenado en blanco	
Figura 2.6	16
a) El árbol de fundición se sumerge en una mezcla de material cerámico (lodo cerámico) líquido	
b) Después de sumergirlo en el lodo cerámico, se recubre de arena cerámica fina	
Figura 2.7	17
Al repetir el proceso de revestimiento con arenas cada vez más gruesas la capa cerámica se vuelve más espesa y resistente	
Figura 2.8	18
a) El árbol de colada es colocado en un autoclave para retirar la cera del interior, dejando así libre la cavidad pero con residuos de cera	
b) La cera remanente es quemada en un horno a alta temperatura (800 °C o más) y se endurece el molde	
Figura 2.9	19
a) El molde cerámico se precalienta antes del vaciado del metal	
b) Una vez caliente el molde se vacía el metal dentro de éste	
Figura 2.10	20
a) Se retira la concha cerámica del árbol	
b) El árbol después varios procesos de limpieza	
Figura 2.11	21
a) Corte del árbol de colada para retirar la pieza	
b) Lijado de la pieza para disminuir los bordes ásperos del corte	
Figura 2.12	22
Algunas operaciones secundarias	
a) Pulido con lijas a alta velocidad	
b) Maquinado	
c) Sandblasteo	
d) Medición	
Figura 2.13	22
a) Pieza Terminada	
b) Pieza en cera y Pieza Terminada con la inyectora de cera y el molde al fondo	
Figura 2.14	25
Partes y funcionamiento de una máquina de prototipado rápido por estereolitografía	
Figura 2.15	26
a) Horno de luz ultravioleta, en donde se introducen los prototipos para el curado final,	
b) Ya que el resultado de éste tipo de prototipado es una resina resistente, puede pintarse y aplicar acabados para hacerlo lucir como la pieza funcional fina	

Figura 2.16	27
Partes y Funcionamiento de la fabricación de objetos laminados	
Figura 2.17	28
Partes principales y principio de operación del proceso de prototipado rápido por deposición de fundido	
Figura 2.18	30
Partes y operación de la máquina para la generación de prototipos mediante sinterización selectiva por láser	
Figura 2.19	31
Partes y funcionamiento del proceso de impresión tridimensional	
Figura 3.1	35
Procedimiento Experimental	
Figura 3.2	36
Modelo de una prótesis de cadera del tipo “hip resurfacing”,	
a) sólido,	
b) líneas ocultas visibles y	
c) vista de sección	
Figura 3.3	37
El modelo en el software de diseño vaciado (hueco),	
a) La operación de vaciado,	
b) Sección transversal del modelo.	
Figura 3.4	39
Modelo reforzado de la prótesis,	
a) Isométrica líneas ocultas visibles,	
b) corte transversal mostrando los refuerzos añadidos en color verde	
Figura 3.5	41
Modelo de árbol de vaciado con piezas ensamblables	
Figura 3.6	42-3
Pantalla del software interfaz de la máquina de prototipado rápido, <i>Catalyst EX</i> .	
Figura X.-	45
Ensamble de ambas piezas de la prótesis de cadera tipo “hipresurfacing”, la esfera en color verde y la copa en color naranja	
Figura X.-	47
Fotografía de la máquina de prototipado rápido por deposición de ABS fundido, <i>Stratasys Uprint</i>	
Figura X.-	48
Prótesis impresa en la máquina de prototipado por ABS fundido.	
Figura X.-	49
Prótesis impresas en la máquina de prototipado por ABS fundido, para la construcción del árbol de fundición	
Figura X.-	49-
a) Preparación del lodo cerámico,	
b) Molde de cerámica ya seco y con el modelo de ABS ya diluido por la acetona.	
Figura X.-	51
Moldes de cerámica sinterizados a 800°C.	
Figura X.-	52
a) Molde de cerámica precalentado para el vaciado del metal,	
b) Vaciado del metal en un horno de inducción.	